

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



TRABAJO FIN DE MÁSTER

**REGISTRO DE PATRONES DE LECTURA CON DISPOSITIVOS DE EYE
TRACKER DE BAJO COSTE Y ESTUDIO DE SU APLICACIÓN PARA LA
RECOMENDACIÓN DE DIAGNÓSTICO DE PATOLOGÍAS**

María Reyes Gentil

Enero 2017

REGISTRO DE PATRONES DE LECTURA CON DISPOSITIVOS DE EYE TRACKER DE BAJO COSTE Y ESTUDIO DE SU APLICACIÓN PARA LA RECOMENDACIÓN DE DIAGNÓSTICO DE PATOLOGÍAS

AUTOR: María Reyes Gentil

TUTOR: Pablo Varona Martínez

Grupo de Neurocomputación Biológica

Dpto. Ingeniería informática

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Enero 2017

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mi tutor del TFM, D. Pablo Varona, por toda su ayuda, dedicación, implicación y paciencia conmigo y con la realización de este trabajo. También, doy las gracias a todos mis profesores de ambos másteres de los que he tenido el honor y la oportunidad de aprender.

Por otro lado, agradezco a Lara Domínguez y Álvaro Romero por la gran aceptación que me hicieron cuando vine a Madrid y a esta nueva universidad. Gracias a vosotros, el cambio ha sido mucho más fácil, llevadero y ha merecido aún más la pena.

No puede faltar mi agradecimiento a mi familia y amigos de Granada que me han ayudado y apoyado desde la distancia y en especial, a mis padres, a mi hermano, a mis tíos y a mi abuela. Gracias a ellos soy lo que soy hoy en día y no tengo palabras para agradecerse.

Por último, agradezco a Ángel Gragera por todo su apoyo desde el primer minuto hasta el último y por esta nueva etapa que ambos estamos compartiendo.

Índice de contenidos

Resumen.....	10
Abstract	11
1. Introducción	12
1.1. Objetivo del TFM.....	12
1.2. Organización del TFM.....	12
2. Estado del Arte	13
2.1. Definición de seguimiento ocular	13
2.2. Historia del Eye tracking.....	14
2.3. Sistema visual humano.....	17
2.4. Seguimiento ocular. Eye tracking.....	23
2.5. Aplicaciones.....	31
2.6. Dispositivos actuales	33
2.7. Dislexia	36
2.8. Déficit de atención e hiperactividad (TDAH).....	44
2.9. Enfermedades neurodegenerativas.....	47
3. Diseño de la aplicación.....	50
3.1. Dispositivo	50
3.2. Usuario final de la aplicación	52
3.3. Aplicación final	53
3.4. Ficheros de configuración	54
3.5. Ficheros de lectura	55
3.6. Resultados	55
4. Desarrollo de la aplicación	56
4.1. Interfaz de la aplicación	56
4.2. Implementación de la aplicación	62
5. Evaluación de la aplicación.....	70
5.1. Objetivos de la evaluación	70
5.2. Textos para la lectura	70
5.3. Procedimiento de evaluación de la aplicación.....	71
6. Resultados	73
6.1. Análisis cualitativo.....	73
6.2. Análisis cuantitativo preliminar.....	85
7. Conclusiones.....	90

8. Retos superados relacionados con el uso de dispositivos de bajo coste.....	93
9. Trabajo futuro	94
10. Anexos	96
Anexo 1: Guía de instalación y configuración inicial del dispositivo.....	96
Anexo 2: Código del programa de registro de patrones	103
Anexo 3: Código del programa de generación de resultados	106
11. Bibliografía	109

Índice de figuras

Ilustración 1: Publicaciones relacionadas con el término “Eye Tracking” hasta 2016.	16
Ilustración 2: Anatomía del ojo humano. Imagen de Wikipedia: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eyesection-es.svg	17
Ilustración 3: Funcionamiento del ojo. Imagen base de Wikipedia: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human_eye_cross_section_detached_retina-es.svg#filelinks	18
Ilustración 4: Músculos extraoculares. Imagen de Wikipedia: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MUSCULOS_OCULARES.JPG	18
Ilustración 5: Lente de contacto con bobina de alambre. Imagen de: (Boleas-aguirre et al., 2007).	24
Ilustración 6: Ejemplo de reflejo corneal con una fuente de luz infrarroja. Imagen de: http://publicacionesmedicina.uc.cl/ManualSemiologia/220ExamenOjos.htm	25
Ilustración 7: Reflexiones de Purkinje.	25
Ilustración 8: Posiciones relativas de la pupila con las primeras reflexiones de Purkinje.	26
Ilustración 9: Gráfico de mirada. Imagen de Flickr: https://www.flickr.com/photos/rosenfeldmedia/10910760393	28
Ilustración 10: Mapa de calor: los colores más "cálidos" representan una elevada concentración de miradas y los colores más "suaves", menos concentración de miradas. Imagen de Flickr: https://www.flickr.com/photos/rosenfeldmedia/10910197294	28
Ilustración 11: Posición del usuario y del dispositivo: http://dev.theeyetribe.com/general/	51
Ilustración 12: Información del dispositivo. Formato JSON: http://dev.theeyetribe.com/general/	52
Ilustración 13: Esquema de la aplicación final.	53
Ilustración 14: Icono QT Creator: https://www.qt.io/ide/	56
Ilustración 15: Interfaz de Inicio.....	57
Ilustración 16: Interfaz de Error.	57
Ilustración 17: Interfaz de Usuario.....	57
Ilustración 18: Código de la ventana de Usuario.	58
Ilustración 19: Interfaz de Información.....	58
Ilustración 20: Interfaz de configuración.	59
Ilustración 21: Interfaz del procedimiento de Calibración del dispositivo.	59
Ilustración 22: Interfaz de Registro de Patrones.....	60
Ilustración 23: Interfaz de Lectura.	60
Ilustración 24: Interfaz de Final.....	61
Ilustración 25: Código parte inicial del main del programa de registro de patrones.	63

Ilustración 26: Código función getFileTimeFolder.	63
Ilustración 27: Código función getUserId.....	64
Ilustración 28: Código función changeFormat.	64
Ilustración 29: Código parte final del main del programa de registro de patrones.....	65
Ilustración 30: Código parte inicial del main del programa de generación de resultados.	67
Ilustración 31: Generación de resultados: " Left_full.png " y " Right_full.png"	68
Ilustración 32: Generación de resultados: " Left.png " y "Right.png"	68
Ilustración 33: Generación de resultados: " Left_color.png " y " Right_color.png".	69
Ilustración 34: Generación de resultados: " Left_pupil.png " y " Right_pupil.png"	69
Ilustración 35: Usuario 1: Resultados del texto del fichero 1	73
Ilustración 36: Usuario 1: Resultados del texto del fichero 2.	74
Ilustración 37: Usuario 1: Resultados del texto del fichero 3.	74
Ilustración 38: Usuario 1: Resultados del texto del fichero 4.	74
Ilustración 39: Usuario 1: Resultados del texto del fichero 5.	75
Ilustración 40: Usuario 1: Resultados del texto del fichero 6.	75
Ilustración 41: Usuario 2: Resultados del texto del fichero 1.	76
Ilustración 42: Usuario 2: Resultados del texto del fichero 2.	76
Ilustración 43: Usuario 2: Resultados del texto del fichero 3.	76
Ilustración 44: Usuario 2: Resultados del texto del fichero 4.	77
Ilustración 45: Usuario 2: Resultados del texto del fichero 5.	77
Ilustración 46: Usuario 2: Resultados del texto del fichero 6.	77
Ilustración 47: Usuario 3: Resultados del texto del fichero 1.	78
Ilustración 48: Usuario 3: Resultados del texto del fichero 2.	78
Ilustración 49: Usuario 3: Resultados del texto del fichero 3.	79
Ilustración 50: Usuario 3: Resultados del texto del fichero 4.	79
Ilustración 51: Usuario 3: Resultados del texto del fichero 5.	79
Ilustración 52: Usuario 3: Resultados del texto del fichero 6.	80
Ilustración 53: Usuario 4: Resultados del texto del fichero 1.	80
Ilustración 54: Usuario 4: Resultados del texto del fichero 2.	81
Ilustración 55: Usuario 4: Resultados del texto del fichero 3.	81
Ilustración 56: Usuario 4: Resultados del texto del fichero 4.	81
Ilustración 57: Usuario 4: Resultados del texto del fichero 5.	82
Ilustración 58: Usuario 4: Resultados del texto del fichero 6.	82
Ilustración 59: Usuario 5: Resultados del texto del fichero 1.	83

Ilustración 60: Usuario 5: Resultados del texto del fichero 2.	83
Ilustración 61: Usuario 5: Resultados del texto del fichero 3.	83
Ilustración 62: Usuario 5: Resultados del texto del fichero 4.	84
Ilustración 63: Usuario 5: Resultados del texto del fichero 5.	84
Ilustración 64: Usuario 5: Resultados del texto del fichero 6.	84
Ilustración 65: Anexo 1: Conectar el dispositivo al ordenador.	96
Ilustración 66: Anexo 1: Situar el rastreador ocular en la posición correcta.	97
Ilustración 67: Anexo 1: Situación del usuario.	98
Ilustración 68: Anexo 1: Iconos de la interfaz de usuario (izquierda) y del servidor (derecha)..	98
Ilustración 69: Anexo 1: Ventana principal de la interfaz de usuario.	99
Ilustración 70: Anexo 1: Ejemplos de la ventana de Trackbox.....	99
Ilustración 71: Anexo 1: Calidad de la calibración.....	101

Índice de tablas

Tabla 1: Parámetros de movimientos sacádicos.....	20
Tabla 2: Micromovimientos.	21
Tabla 3: Comparativa de Eye Trackers.	34
Tabla 4: Comparativa de Eye Trackers (Continuación).	35
Tabla 5: Información de las columnas de los ficheros del registro del patrón de lectura.	66
Tabla 6: Resultados obtenidos de líneas de texto vs líneas leídas por el usuario.	85
Tabla 7: Cantidad de desplazamientos hacia atrás. Versión 1.....	86
Tabla 8: Cantidad de desplazamientos hacia atrás. Versión 2.....	87
Tabla 9: Cantidad de desplazamientos hacia arriba. Versión 1.	88
Tabla 10: Cantidad de desplazamientos hacia arriba. Versión 2.	89
Tabla 11: Anexo 1: Mensajes de error.	100
Tabla 12: Anexo 1: Pestaña de opciones.....	100
Tabla 13: Anexo 1: Clasificación y mensajes de calibración.....	102
Tabla 14: Anexo 1: Pestaña de calibración.....	102

Resumen

Una de las tecnologías de mayor auge actualmente es la de *Eye Tracking* o seguimiento ocular. Existen multitud de aplicaciones que hacen uso de dispositivos de seguimiento ocular en ámbitos muy diversos desde marketing, estudios de usabilidad, psicología, medicina, etc. Una gran cantidad de grupos de investigación están utilizando esta tecnología para desarrollar y validar su trabajo actual y, empresas tecnológicas de gran renombre están mejorando sus propias aplicaciones e incorporando sistemas de seguimiento ocular a sus dispositivos. En este trabajo se ha abordado el desarrollo de una aplicación de registro de patrones de lectura con un dispositivo de seguimiento ocular de bajo coste, lo que permite que el precio no sea un impedimento para el análisis, validación y uso de los resultados de este trabajo. Tras el estudio de los principales dispositivos de seguimiento ocular, el rastreador ocular elegido corresponde a un modelo de la empresa *The Eye Tribe*, *The Eye Tribe Tracker*. Este dispositivo tiene un precio bastante inferior a sus competidores, pero su precisión es lo suficientemente aceptable para la realización de este estudio. La aplicación resultante no solo registra los patrones de lectura del usuario, sino que también incorpora gran cantidad de aspectos de valor añadido, tanto mejoras en la interfaz como mejoras a nivel interno que se comentan a lo largo de esta memoria. La aplicación se ha orientado para su uso en el ámbito médico, en concreto, para la recomendación de diagnóstico de distintas patologías, entre ellas, dislexia, déficit de atención y enfermedades neurodegenerativas. Para ello, se ha realizado un estudio de la importancia de esta tecnología para este fin y los posibles elementos que se deberían incorporar a la aplicación resultante para que pudiera ser utilizada en este contexto. El desarrollo de la aplicación y el estudio de su posible uso en el ámbito médico van acompañado de un procedimiento de validación de la misma con un conjunto reducido de usuarios reales y también, del análisis y evaluación de los resultados obtenidos en los patrones de lectura por estos usuarios. Finalmente, este Trabajo de Fin de Máster termina comentando las principales conclusiones y retos del trabajo planteado, así como, una revisión de posibles trabajos futuros a realizar.

Palabras Clave: Seguimiento ocular (“Eye tracking”), rastreador ocular (“Eye Tracker”), dislexia, déficit de atención, enfermedades neurodegenerativas.

Abstract

Currently, one of the most important technologies is Eye Tracking. There are many applications that make use of eye tracking devices in very different fields from marketing, usability studies, psychology, medicine, etc. A lot of research groups are using this technology to develop and validate their current work and, companies of great reputation are improving their own applications and incorporating eye tracking systems to their main devices. This work has addressed the development of a reading pattern recording application with a low-cost eye tracking device. The use of this device has allowed the price not to be an impediment to the analysis, validation and use of the results of this work. Following the study of the main eye trackers, the chosen eye tracker corresponds to a model of the company *The Eye Tribe*, *The Eye Tribe Tracker*. This device has a lower cost than its competitors, but its accuracy is sufficiently acceptable for the execution of this study. The resulting application registers the user's reading patterns and, also, incorporates a lot of aspects that add value to this application, both interface improvements and internal improvements that are discussed throughout this report. The application has been oriented to its use in the medical field, specifically, for the recommendation of diagnosis of different pathologies such as dyslexia, attention deficit and neurodegenerative diseases. For that, a study has been made of the importance of this technology for this objective including the possible elements that should be incorporated into the resulting application so that this application could be used in this context. The development of the application and the study of its possible use in the medical field are accompanied of a validation procedure of the application with a reduced set of real users. It has also made an analysis and evaluation of reading patterns obtained by these users. Finally, this Final Master's Work conclude by commenting on the main conclusions and challenges of the work presented, as well as a review of future work that can be done.

Keywords: Eye tracking, Eye tracker, dyslexia, attention deficit, neurodegenerative diseases.

1. Introducción

El estudio de la actividad humana relacionado con la interacción con un ordenador es de gran interés ya que puede explicar aspectos importantes del comportamiento humano. Una clase de comportamiento interesante dentro de la investigación en interfaces hombre – máquina es el movimiento ocular debido a que distintos grupos de usuarios de ordenador pueden recibir más de un 80% de su entrada de percepción a través del canal visual (Cuddihy Elisabeth Guan Zhiwei Ramey, 2005). Los movimientos oculares reflejan aspectos tanto de la actividad realizada como características específicas del individuo. Por lo tanto, las técnicas para estudiar el comportamiento del movimiento del ojo se han considerado un medio eficaz para la caracterización de interacciones humano-ordenador.

La importancia de los movimientos oculares para evaluar la actividad humana reside en que representan una cantidad manifiesta, observable y, por tanto, medible asociada con las interacciones y que tiene una relación predecible con los procesos cognitivos asociados con la atención visual. Como resultado de esta relación, medidas del seguimiento ocular como el número total de las fijaciones, las duraciones de las fijaciones y la trayectoria/ruta de exploración (que se definen más adelante en este trabajo) pueden proporcionar información detallada sobre cómo los usuarios realizan tareas. Esta información sería difícil y, en algunos casos, imposible de almacenar utilizando otros métodos de “Human Computer Interaction” (HCI) (Kowler, 2012).

Los esfuerzos de utilizar el seguimiento ocular como un medio para explicar cómo los sujetos realizan tareas se detallan en muchos estudios de esta área especializada de HCI (Rayner, 1998, Duchowski, 2002; Jacob and Karn, 2003; Poole and Ball, 2005). Debido a la proliferación del uso de seguimiento ocular en disciplinas muy distintas, esta literatura puede parecer muy fragmentada. Sin embargo, un tema recurrente en toda ella es la comprensión de cómo los usuarios realizan tareas analizando los movimientos oculares. Aprovechando el seguimiento ocular de esta manera, se han logrado grandes avances en la comprensión de los comportamientos de los usuarios durante las interacciones, así como, el estudio de estos comportamientos en personas con algún tipo de trastorno visual o de lectura como puede ser déficit de atención, dislexia, etc. (Lai et al., 2013; Rosch and Vogel-Walcutt, 2013; Popa et al., 2015; Sharafi et al., 2015)

1.1. Objetivo del TFM

El objetivo central de este trabajo es el diseño de una aplicación para registrar y caracterizar los patrones de lectura con la intención de hacer recomendaciones de diagnóstico de distintas patologías, entre ellas, dislexia, déficits de atención, enfermedades neurodegenerativas, etc. Para ello, se utilizará un rastreador ocular de bajo coste que permitirá incluir el sistema desarrollado en ámbitos muy diferentes y con un gasto menor al esperado para un sistema con estas características.

1.2. Organización del TFM

Tras el desarrollo de la introducción y el principal objetivo del TFM, la organización de la presente memoria consta de los siguientes apartados: estado del arte, diseño de la aplicación, desarrollo de la aplicación, evaluación y análisis de los resultados y, finalmente, conclusiones, retos y trabajo futuro.

2. Estado del Arte

Actualmente, existe una gran cantidad de artículos y publicaciones sobre el seguimiento ocular y campos relacionados con el mismo. Estos campos no sólo están relacionados con la medicina sino también, con otras muchas disciplinas como la biología, psicología, neurología, usabilidad informática, marketing, etc. Por ejemplo, en marketing, uno de los campos con mayor inversión en este tema, se puede utilizar un sistema de seguimiento ocular para investigar las reacciones de los usuarios del diseño de empaquetado de un producto (Graham et al., 2012; Milosavljevic et al., 2012), comprender el comportamiento de los clientes en la búsqueda online (McCarthy et al., 2004) o como herramienta de medida de usabilidad de la página web de un establecimiento. Una visión general sobre seguimiento ocular podría llenar libros, uno de los más recomendables es el texto clásico de (Duchowski, 2007) en el que encontramos una descripción de los principales aspectos relacionados con el seguimiento ocular, algunos de los cuales, se comentarán en las siguientes secciones.

En este apartado, se comienza con una definición de seguimiento ocular seguido de algunas de las referencias más relevantes en su historia. A continuación, se explica de manera resumida el sistema visual humano y sus principales funcionalidades y características. En la siguiente sección, se desarrollan con mayor detalle los principales aspectos del seguimiento ocular. Finalmente, las últimas secciones se centrarán en el conocimiento de diferentes patologías que se pueden estudiar mediante el seguimiento ocular: dislexia, déficit de atención e hiperactividad y enfermedades neurodegenerativas. Se estudiarán sus principales síntomas y su relación con las técnicas de seguimiento ocular.

2.1. Definición de seguimiento ocular

El seguimiento ocular (“Eye tracking”) se utiliza para referirse a la estimación de la dirección de la mirada del usuario. En la mayoría de los casos, la estimación de la dirección de la mirada significa la identificación del objeto al cual se está mirando. En el caso de un dispositivo de ordenador estándar, las coordenadas en la pantalla identifican el objeto al que el usuario mira. La interpretación de la dirección de la mirada es más compleja para el seguimiento ocular en los mundos virtuales en 3D y aún más difícil cuando hay interacción con el mundo real.

Los sistemas de seguimiento ocular también conocidos como rastreadores oculares (“Eye trackers”) difieren en el número de medidas o grados de libertad que pueden rastrear. Los rastreadores oculares más simples informan solo de la dirección de la mirada respecto a la cabeza (EOG y sistemas montados en la cabeza) o respecto una posición fija del globo ocular (estos sistemas requieren una fijación de la cabeza). Los sistemas más sofisticados permiten movimientos de la cabeza a diferencia de los sistemas estacionarios que corresponden a los comentados anteriormente. Estos sistemas hacen algún tipo de seguimiento de la cabeza implícito en el proceso de seguimiento ocular. Adicionalmente, pueden registrar otros parámetros como el tamaño de la pupila. La gran mayoría de los rastreadores oculares utilizan cámaras con fuente de luz infrarroja con rayos infrarrojos (LED). Estos rayos hacen posible medir la distancia y el ángulo de la reflexión de la luz desde el centro de la pupila y, como resultado, identificar el punto al que el observador está mirando. El observador puede inspeccionar libremente los elementos visuales, por lo tanto, no se requieren accesorios adicionales para la cabeza que limiten su movimiento. Además de eso, también se cree que los dispositivos de seguimiento ocular que emplean el método de iluminación infrarroja tienen la suficiente

exactitud en el trazado para poder ser utilizados tanto en investigación como en entornos comerciales (Oyekoya and Stentiford, 2006; Wendel and Pieters, 2011)

Normalmente, hay dos tipos de movimientos oculares que se pueden capturar con la mayoría de los dispositivos de seguimiento ocular, son las fijaciones y las sacadas. Las fijaciones se producen cuando se mira a un punto fijo y por lo general, tiene una duración de alrededor de 200 a 500 milisegundos. En cambio, los movimientos sacádicos son saltos rápidos entre estas fijaciones que suelen durar entre 10 y 100 milisegundos (Wendel and Pieters, 2011). Normalmente, durante los movimientos sacádicos no se adquiere información visual (Hyokki, 2011).

La mayoría de rastreadores de seguimiento ocular basados en vídeo proporcionan no sólo la dirección de la mirada, sino también otros datos adicionales, entre ellos, el tamaño de la pupila. El cambio de tamaño de la pupila es una respuesta emocional a la escena percibida y por esta razón, es muy interesante y utilizado en investigación. Sin embargo, ya que la función principal de la pupila es la regulación de la cantidad de luz que entra al ojo, este tipo de estudios requieren condiciones de luz estables.

Hay otras formas de seguimiento ocular, por ejemplo (Ravyseu et al., 2000) y (Tian et al., 2000), en las cuáles se realiza el seguimiento ocular como un todo centrándose en la forma del ojo y en ocasiones, incluye las cejas para la realización del seguimiento ocular. El término seguimiento de mirada (“Eye-gaze tracking” o “gaze tracking”) se utiliza en varios estudios (Morimoto and Mimica, 2005; Drewes, 2010; Rozado et al., 2012; Ferhat and Vilarino, 2016) . Este término sería más preciso ya que excluye interpretaciones erróneas. Sin embargo, la mayoría de los investigadores de este campo suelen utilizar el término más general o utilizan indistintamente ambos términos.

2.2. Historia del Eye tracking

Los primeros rastreadores oculares fueron construidos a finales del siglo XVIII y desde entonces, una variedad de técnicas diferentes se ha aplicado para recoger los movimientos oculares. Las primeras descripciones cualitativas de los movimientos oculares se remontan al siglo XVIII (Porterfield, 1737). Al final de ese siglo, Wells utiliza imágenes residuales, conocidas como imágenes fantasmas, para describir el movimiento de los ojos. Estas imágenes aparecen en la percepción visual después de mirar durante un tiempo al mismo lugar. En el siglo XIX, Javal (Javal, 1879) y Lamare (Lamare, 1892) observaron los movimientos oculares durante la lectura e introdujeron el término “saccade” (sacada), de origen francés, para los movimientos bruscos de los ojos. Estos últimos autores, también utilizaron un acoplamiento mecánico de los ojos y los oídos para hacer audibles los movimientos oculares. Además, Javal también explicó que el movimiento ocular que tiene lugar durante la lectura no es un suave barrido de los ojos a lo largo del texto, tal y como se suponía, sino una serie de paradas cortas (fijaciones) y movimientos rápidos. Ahrens, Delabarre y Huey (Delabarre, 1898; Huey, 1898; Ahrens, 1981) fueron los primeros que intentaron registrar los movimientos de los ojos transfiriendo los movimientos a una superficie cubierta de hollín, a través de un cable fijado al globo ocular.

A principios del siglo XX, Dodge y Cline (Dodge and Cline, 1901) aplicaron el primer método para recoger los movimientos oculares reflejando una fuente externa de luz a la fóvea. Crearon un “fotocronógrafo” para grabar los movimientos oculares producidos durante la lectura y durante los movimientos rotacionales. Este aparato utilizaba un método fotográfico y los reflejos de la luz sobre el ojo para grabar estos movimientos en dirección horizontal. Algunos años más tarde

Judd, McAllister y Steel (Judd et al., 1905) aplicaron la fotografía cinematográfica para grabar el movimiento del ojo. La invención de la fotografía cinematográfica permitió analizar fotograma a fotograma el movimiento ocular y las primeras investigaciones cuantitativas sobre una base sólida. Gracias a este sistema, en los años 30, Guy Thomas Buswell analizó los movimientos oculares en función de la edad y del nivel escolar de los sujetos que utilizaron el sistema (Buswell, 1935, 1937). De estos estudios, se concluye la existencia de variaciones en las fijaciones y sacadas entre distintas edades y distintos niveles de educación, lo que sirvió para avanzar en los campos de educación y alfabetización.

En la década de 1930, Miles Tinker estudió los movimientos oculares e investigó el efecto del tipo de letra, tamaño de fuente y el diseño en la velocidad de lectura. (Tinker and Paterson, 1931). En 1939, Jung midió los movimientos oculares verticales y horizontales simultáneamente con electrodos situados en la piel cerca de los ojos. Este método también llamado electrooculografía (EOG) mide los campos eléctricos del globo ocular y también, permitió el procesamiento en tiempo real de los datos de la mirada por medio de la electrónica analógica. En 1947, Paul Fitts utilizó cámaras de cine para registrar los movimientos oculares de los pilotos de las fuerzas aéreas en el aterrizaje. El interés de este estudio era saber cómo los pilotos utilizan los controles de vuelo. Este fue el primer estudio de usabilidad con ayuda del seguimiento ocular (Jacob and Karn, 2003). En 1948, Hartridge y Thompson inventaron el primer rastreador ocular montado en la cabeza que permitía movimientos libres de la misma. Entre 1950 y 1960, el psicólogo ruso Alfred L.Yarbus realizó una serie de experimentos sobre los patrones de movimiento ocular cuyos resultados se recogieron en (Yarbus, 1967).

En la década de 1970, se produjeron una gran cantidad de mejoras en la tecnología de seguimiento ocular. Los rastreadores oculares se volvieron menos intrusivos proporcionando una mayor precisión y utilizando las imágenes de video del ojo para determinar la localización de la mirada del usuario en la pantalla. Esto fue posible mediante el uso de luz infrarroja (Duchowski, 2007). En esta década también destacaron en la investigación en este campo Stanford Earl Taylor y John Merchant. El primero, creó un dispositivo mecánico para almacenar permanentemente el movimiento realizado por el ojo (Taylor, 1971) y John Merchant (Merchant et al., 1974) desarrolló un sistema que contaba con un oculómetro que obtenía el punto de mirada mediante la detección de la pupila y los reflejos de la córnea. También, en este periodo, la psicología comenzó a estudiar la percepción y los fenómenos cognitivos con estas técnicas.

En la década de 1980, los ordenadores se volvieron lo suficientemente potentes como para hacer seguimiento ocular en tiempo real y esto permitió utilizar rastreadores oculares basados en vídeo para la interacción persona-ordenador. Bolt presentó un primer sistema en 1981 (Bolt, 1981) . También, en esta época aparecieron los primeros rastreadores oculares para ayudar a los usuarios con discapacidad (Majaranta et al., 2002).

Desde la década de 1990 hasta ahora, ha habido un aumento constante en el uso de rastreadores oculares. La caída de precios de los sistemas de seguimiento hizo que su uso se ampliara a la investigación de marketing o estudios de usabilidad. Hoy en día, el seguimiento de los movimientos oculares puede ser capturado manteniendo el movimiento libre de la cabeza mediante el seguimiento del brillo de la pupila y la reflexión corneal (Jacob and Karn, 2003; Duchowski, 2007). Por lo tanto, el seguimiento ocular es fácilmente aplicable en investigación de interacción humana, por lo que el número de estudios que utilizan seguimiento ocular está aumentando drásticamente.

Uso actual de seguimiento ocular

La tecnología de seguimiento ocular ha sido ampliamente utilizada en diferentes campos de investigación, incluyendo estudios sobre la discapacidad (Betke et al., 2002; Sears and Young, 2002; Hornof and Cavender, 2005), comercialización (Wedel and Pieters, 2000; Maughan et al., 2007), psicología (Allopenna et al., 1998; Johnson et al., 2003) y estudios aplicados a los factores humanos. Estos estudios de factores humanos incluyen la evaluación de las habilidades quirúrgicas, sistemas de gestión de vuelo (Hanson, 2004; Frische et al., 2011) y estudios de las habilidades de conducción (Martens and Fox, 2007). Sin embargo, los rastreadores oculares se utilizan más intensamente en la investigación de usabilidad y en el campo de interacción humano-ordenador (HCI) (Poole and Ball, 2005).

Para terminar este apartado de revisión histórica, se muestra un gráfico donde se puede apreciar el aumento de publicaciones relacionadas con el término “Eye Tracking” en la base de datos “Scopus”.

Documents by year

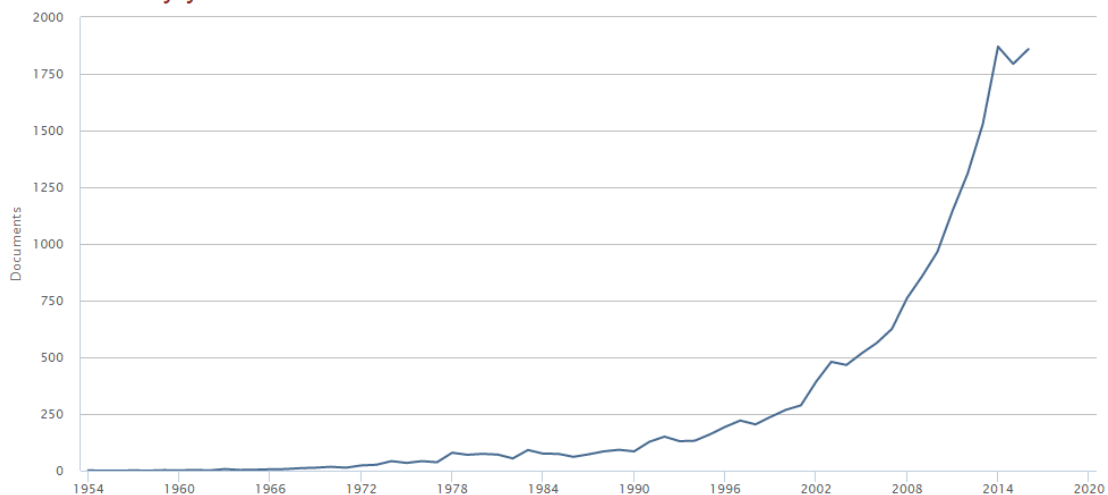


Ilustración 1: Publicaciones relacionadas con el término “Eye Tracking” hasta 2016.

2.3. Sistema visual humano

En este apartado, se comentan los principales aspectos del sistema visual humano necesarios para comprender los sistemas de seguimiento ocular y su terminología.

El ojo humano es un sistema óptico convergente que forma una imagen invertida del mundo externo sobre la capa sensible de la retina, situada al fondo del globo ocular. Aunque a menudo el ojo es denominado como el órgano de la visión, el órgano que efectúa el proceso de la visión es el cerebro. Así, la función principal del ojo es traducir las vibraciones electromagnéticas de la luz en un impulso nervioso que se transmite al cerebro.

2.3.1. Estructura anatómica del ojo humano

La estructura anatómica del ojo se muestra en la ilustración 2. Se pueden distinguir las siguientes partes:

- El **globo ocular** es una estructura esférica de aproximadamente de 2.5 cm de diámetro con un marcado abombamiento en su superficie anterior.
- La parte exterior del globo ocular o cubierta se compone de tres capas de tejido:
 - La **esclerótica** o capa más externa, tiene una función protectora y cubre unos cinco sextos de la superficie ocular.
 - La **úvea** o capa media, tiene tres partes diferenciadas: la coroides, cuerpo ciliar e iris.
 - La **retina** o capa más interna, sensible a la luz.
- La **córnea** es una membrana resistente a través de la cuál entra la luz en el interior del ojo. Por detrás, hay una cavidad llena de un fluido claro y húmedo (**humor acuoso**) que separa la córnea de la lente del **crystalino**. La córnea está conectada con el **músculo ciliar** que junto a los tejidos circundantes forman el **cuerpo ciliar**. Esta estructura redondea la lente cambiando su longitud focal.
- El **iris** es una estructura pigmentada suspendida entre la córnea y el cristalino y tiene una abertura circular en el centro, la **pupila**. El tamaño de la pupila depende de un músculo que rodea sus bordes, aumentando o disminuyendo su tamaño cuando este músculo se contrae o se relaja. De esta forma, controla la cantidad de luz que entre en el ojo.
- El ojo está lleno de una sustancia transparente y gelatinosa denominada **humor vítreo**.

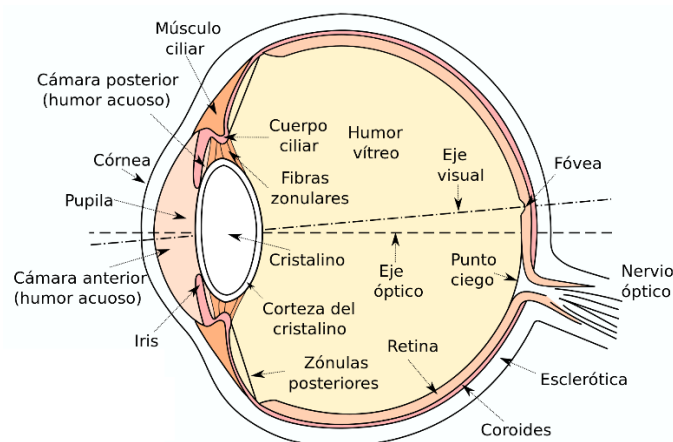


Ilustración 2: Anatomía del ojo humano. Imagen de Wikipedia:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eye-section-es.svg>

2.3.2. Funcionamiento del ojo

El ojo funciona como una cámara fotográfica (véase ilustración 3). La lente del cristalino forma en la retina una imagen invertida de los objetos que enfoca. La retina se corresponde con la película sensible a la luz. Explicado con otras palabras, para poder ver un objeto, la luz debe reflejarse en el objeto, entrar en el ojo y enfocarse en la retina, lámina superficial interna del fondo del ojo. Estos rayos de luz se codifican y se conducen por el nervio óptico hasta la zona visual del cerebro donde son procesados.

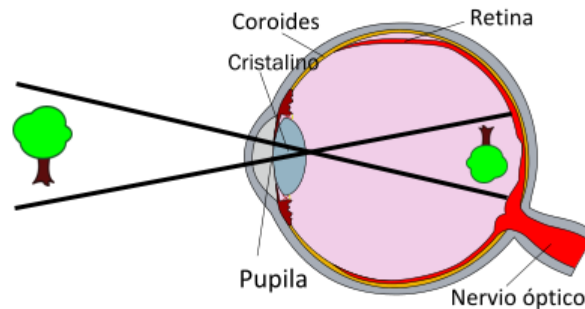


Ilustración 3: Funcionamiento del ojo. Imagen base de Wikipedia:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human_eye_cross_section_detached_retina-es.svg#filelinks

Como se ha comentado en el apartado anterior, el enfoque del ojo se lleva a cabo debido a que la lente del cristalino se aplanan o redondea. Este proceso se llama **acomodación**. En un ojo normal no es necesario la acomodación para ver los objetos distantes ya que se enfocan en la retina cuando la lente está aplanada gracias al ligamento suspensorio.

El campo visual del ojo humano se divide en distintas zonas, aunque no solemos ser conscientes de esta circunstancia debido a que los ojos están en constante movimiento y la retina se excita en una u otra parte según el foco de atención del ojo. Los músculos de los ojos funcionan de forma simultánea desempeñando la importante función de converger su enfoque en un punto para que las imágenes de ambos ojos coincidan. El movimiento ocular y la fusión de estas imágenes también contribuyen en la estimación visual del tamaño y la distancia.

En general, los ojos se mueven dentro de seis grados de libertad: tres traslaciones y tres rotaciones. Hay seis músculos responsables del movimiento ocular conocidos como **músculos extraoculares** (véase ilustración 4): el recto medial y lateral (movimientos laterales), el recto superior e inferior (movimientos arriba/abajo) y los oblicuos superior e inferior (torsión). Los cuatro rectos están alineados con sus puntos de origen mientras que los oblicuos se insertan en la superficie ocular formando un ángulo.

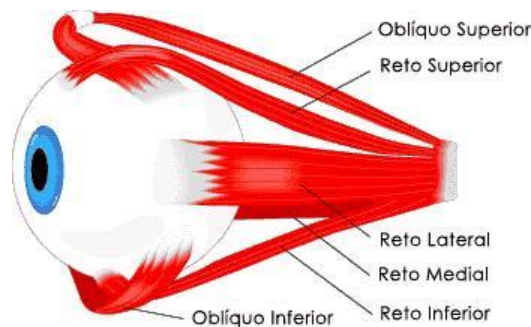


Ilustración 4: Músculos extraoculares. Imagen de Wikipedia:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MUSCULOS_OCULARES.JPG

2.3.3. Movilidad ocular

Los músculos extraoculares, los nervios oculomotores y sus núcleos de origen, constituyen la unidad motora que efectúa los movimientos oculares conocido como **sistema oculomotor o sistema visual motor**. Los movimientos binoculares, voluntarios y reflejos son posibles gracias a que los estímulos llegan por distintas vías (centrales y periféricas) integrándose en el tallo cerebral. La binocularidad es característica de los movimientos oculares, de ahí la necesidad de centros que coordinen los distintos estímulos y su llegada a las unidades motoras de ambos ojos. Existen multitud de centros para la coordinación de los estímulos, clasificados en **centros corticales y centros subcorticales**.

2.3.4. Sistema oculomotor o sistema visual motor

El sistema oculomotor tiene como función:

- Conducir los estímulos visuales del campo periférico de visión al campo visual central.
- Mantener la fijación de la fóvea en el objeto en movimiento.
- Captar y afianzar las imágenes de la fóvea.
- Estabilizar las imágenes en la fóvea cuando se producen movimientos de la cabeza.

El sistema oculomotor puede dividirse en vías supra, inter e intranucleares (Martin and Corbett, 2000):

- Las **vías supranucleares** se origina en la corteza cerebral y son moduladas por el cerebro y el aparato vestibular para coordinar el movimiento de la cabeza y del cuerpo. Estas zonas, así como las funciones que desempeñan, se llaman supranucleares ya que son las primeras que dan las órdenes, incluso antes que los núcleos motores de los nervios craneales.
- Las **vías internucleares** proporcionan conexiones directas entre ciertos núcleos motores para coordinar el movimiento binocular.
- Las **vías intranucleares** empiezan por los núcleos motores de los tres nervios craneales implicados en el movimiento del ojo. Incluye la trayectoria hacia los músculos extraoculares, la traducción de señales en la unión neuromuscular y finalmente, el movimiento muscular que produce la rotación de los ojos.

2.3.5. Tipos de movimientos oculares

En el sistema oculomotor se pueden distinguir tres tipos de movimientos oculares (Gila et al., 2009):

1. Movimientos automáticos de compensación de los movimientos de la cabeza (**reflejos vestibulo-oculares**) y del entorno visual (**reflejos optocinéticos**) para estabilizar la imagen en la retina y posibilitar la fijación voluntaria de la mirada en un determinado punto.
2. Movimientos voluntarios para desplazar la fijación de un punto a otro del campo visual (**movimientos de re-fijación o sacádicos/sacadas**) y para perseguir con la mirada objetos móviles (**movimientos de seguimiento y de vergencia**).
3. Micromovimientos asociados a la fijación ocular: **temblor, microsacadas y derivas**.

A continuación, se comenta las características de los movimientos anteriores:

Reflejo vestibulo-ocular

Las conexiones entre el sistema vestibular y ocular permiten la coordinación de los movimientos oculares y los movimientos de la cabeza contrarrestando el desplazamiento de la cabeza asegurando la estabilidad de la imagen en la retina.

Reflejo optocinético

Permite que se fije la mirada en un punto del campo visual, aunque los estímulos visuales del campo periférico estén en movimiento.

Movimientos sacádicos o de re-fijación

Son desplazamientos rápidos de los ojos entre dos puntos de fijación. Estos movimientos son los más rápidos y llegan a tener velocidades de 700° por segundo (Mitchell and Wich, 1974). Así, una persona normal realizaría más de 20000 movimientos sacádicos a lo largo del día.

El rastreo visual de una escena se produce mediante una sucesión de movimientos sacádicos y las correspondientes fijaciones entre ellos. Los movimientos sacádicos pueden ser ejecutados voluntariamente y autoinducidos (no provocados por la aparición de un estímulo específico) o en respuesta a estímulos visuales. La mayoría de estos últimos se realizan para dirigir la mirada hacia el nuevo estímulo (prosacada), pero también pueden alejarse de él (antisacada). Existen movimientos sacádicos involuntarios como respuestas reflejas desencadenadas por la aparición súbita de un estímulo en la periferia del campo visual y los movimientos oculares del sueño REM.

Los movimientos sacádicos pueden caracterizarse por una serie de parámetros que se muestran en la siguiente tabla:

Movimientos sacádicos	
Amplitud máxima	30º desplazamientos superiores requieren movimiento de la cabeza
Duración	30 – 120 ms según la amplitud del desplazamiento
Velocidad máxima	Alcanzada durante la sacada: hasta 700°/s
Main Relation	Relación constante entre amplitud y velocidad máxima: a mayor amplitud del movimiento mayor velocidad máxima. La dirección y la velocidad no se pueden modificar una vez lanzado el movimiento
Latencia o tiempo de reacción sacádica	Tiempo entre la aparición de un estímulo y el inicio de la sacada: 180 – 300 ms. En condiciones normales se producen movimiento de menor latencia (80 – 100 ms) llamados sacádicos express.
Periodo refractario motor	100 – 200 ms siguientes al término de una sacada durante los cuales no puede iniciarse voluntariamente un nuevo movimiento sacádico
Tiempo mínimo de fijación	200 – 350 ms, comprende el periodo refractario motor y un tiempo de procesamiento cognitivo del objeto enfocado (50 ms mínimo). Existe una relación directa de la fijación y la amplitud de la sacada precedente: la fijación es más larga cuanto mayor ha sido el desplazamiento sacádico anterior

Tabla 1: Parámetros de movimientos sacádicos.

Movimiento de seguimiento o de persecución lenta

Son movimientos voluntarios que permiten que ambos ojos mantengan estabilizada la imagen foveal de estímulos que se desplazan lentamente por el campo visual. Dicho en otras palabras, permiten que los ojos puedan seguir visualmente los objetos que se desplazan delante de ellos lentamente, manteniendo el objetivo visual proyectado permanentemente en la fovea.

Su velocidad se adapta a la del objeto, siempre que no supere los 45°/s. La información proporcionada es una imagen nítida y de mejor calidad cuanto más lento sea el movimiento del entorno a seguir con la mirada.

Movimientos de vergencia (convergencia, divergencia)

Son movimientos en los que los ojos siguen direcciones opuestas. Permiten una adecuada alineación binocular en relación con la distancia del punto de fijación para proyectar la imagen sobre la retina de los dos ojos y obtener una única imagen fusionada. En los movimientos de convergencia los ojos se dirigen hacia la línea media para enfocar objetos cercanos mientras que en los movimientos de divergencia sucede lo contrario. En ambos se puede alcanzar velocidades de unos 10°/s y amplitudes de 15°.

Fijación ocular

Cuando fijamos la mirada en un punto determinado, la imagen procedente del mismo incide en la zona de mayor resolución espacial de la retina, es decir, sobre la fovea. Pero durante la fijación los ojos no permanecen totalmente inmóviles, por el contrario, realizan constantes movimientos involuntarios (e independientes para cada ojo) de pequeña amplitud (inferior a 1°). Inmovilizando completamente el ojo durante la fijación se esperaba que la agudeza visual aumentara para evitar borrosidad. Sin embargo, en tales circunstancias se comprobó que la percepción de la imagen desaparecía. Los micromovimientos oculares durante la fijación ayudan a evitar este fenómeno de desvanecimiento (*fading*) (Tulunay-Keesey, 1982). Dentro de los micromovimientos oculares se puede distinguir tres tipos:

Micromovimientos asociados a la fijación ocular	
Derivas o fluctuaciones (drifts)	Irregulares, lentos (0,1°/s), centrífugos y de 2-5 minutos de arco de amplitud
Microsacadas(flicks)	Muy rápidos, amplitud < 1°, para corregir la posición cuando las derivas han alejado excesivamente la imagen del centro de la fovea o cuando la fijación en un punto estacionario excede los 300-500 ms
Temblor (temor)	Oscilaciones de alta frecuencia (30-150 Hz) y muy baja amplitud (24 segundos) que se superponen a los otros micromovimiento

Tabla 2: Micromovimientos.

2.3.6. Sistema visual humano en niños

El sistema visual comentado no se desarrolla completamente hasta los 7 u 8 años de edad (Feman and Reinecke, 1997). Para poder comprender su sistema visual es importante conocer cómo se desarrolla la visión normal ya que cualquier alteración durante su desarrollo puede provocar, en mayor o menor medida, algún déficit en la visión.

Al nacer, el sistema visual de un niño se caracteriza por:

1. Una retina dividida en cuadrantes. La fóvea (donde se obtiene la máxima agudeza visual) está incompleta y no tiene pleno funcionamiento hasta las 16 semanas de vida. Por ese motivo, los recién nacidos ven borroso y no distinguen los colores.
2. Los globos oculares son capaces de rotar dentro de sus órbitas de forma burda lo que hace que los movimientos de los ojos no sean uniformes ni eficaces.
3. La capacidad para cambiar la focalización no está totalmente desarrollada.

Los ojos y la visión se irán desarrollando en los primeros años mejorando su funcionamiento de manera progresiva. No obstante, algunos factores ambientales, familiares y el empleo inadecuado de los ojos pueden afectar al desarrollo de la función visual y hacer que no llegue a ser adecuado. Esto hará que el niño vea y observe menos y por lo general, aprenda menos dando lugar a déficits en el proceso de aprendizaje.

2.3.7. Análisis del movimiento del ojo

De los apartados anteriores se concluye que, en base a la funcionalidad de los movimientos oculares, sólo tres tipos de movimientos necesitan ser modelados para profundizar en la localización de la atención visual. Estos tipos de movimientos son los movimientos sacádicos, de seguimiento o persecución lenta y las fijaciones (Duchowski, 2007). Por lo tanto, el requisito principal para el análisis del movimiento de ocular en el contexto del diseño de sistemas de seguimiento ocular es la identificación de estos tres movimientos debido a que estos movimientos suponen evidencia de la atención visual voluntaria y manifiesta del individuo. No obstante, esta suposición no excluye la utilización involuntaria de estos movimientos. Así, las fijaciones se corresponden con el deseo de mantener la mirada en un objeto de interés. Del mismo modo, los movimientos de seguimiento o de persecución lenta se utilizan para objetos con movimiento suave. Por último, las sacadas se consideran manifestaciones del deseo de cambiar voluntariamente el foco de atención.

2.4. Seguimiento ocular. Eye tracking

Como ya se ha comentado, el dispositivo de medición más utilizado para registrar los movimientos oculares se conoce como **sistema de seguimiento ocular** o más comúnmente como **rastreador ocular**. En general, hay dos tipos de técnicas de seguimiento del movimiento del ojo:

- Las que miden la posición del ojo respecto a la cabeza.
- Las que miden la orientación del ojo en el espacio o el POR (“point of regard”, traducido como punto de mirada) (Young and Sheena, 1975).

Esta última medida es la registrada normalmente y se utiliza cuando preocupa la identificación de los elementos en la escena visual, por ejemplo, en aplicaciones/gráficos interactivos. Posiblemente, el sistema más ampliamente utilizado para la medición del punto de mirada son los rastreados oculares de reflexión ocular basados en video. En este apartado, se comentan las principales técnicas de medición del movimiento del ojo y las características de los rastreados oculares basados en vídeo. A continuación, se explican las principales medidas/métricas utilizadas por los rastreadores oculares para realizar el seguimiento ocular. En las dos siguientes secciones, se comentan los aspectos relacionados con la calidad de los rastreadores oculares y los límites que tienen los estudios realizados con estos dispositivos. Finalmente, se concluye esta sección con un apartado de aplicaciones de los rastreadores oculares y los principales dispositivos desarrollados por las principales empresas dedicadas al seguimiento ocular.

2.4.1. Clasificación de metodologías para la medición de movimientos oculares

Hay cuatro categorías generales de metodologías de medición de los movimientos oculares (Duchowski, 2007):

- Electrooculograma (EOG)
- Lentes de contacto escleral/bobina de búsqueda
- Foto-oculografía (Photo-oculography, POG) y video-oculografía (Video-oculography, VOG)
- Reflexión corneal basada en video

La electrooculografía se basa en los registros de las diferencias de potencial eléctrico (señal de corriente continua) de la piel que rodea la cavidad ocular. A mediados de la década de 1970, esta técnica fue el método de seguimiento de movimiento ocular que más se aplicaba (Young and Sheena, 1975). Hoy en día, la técnica más aplicada es la basada en reflexión corneal, la cual se utiliza principalmente para determinar el punto de mirada.

El primer método para medidas del ojo utilizando reflexión corneal apareció en 1901 (Robinson, 1968). Posteriormente, se utilizaron las lentes de contacto desarrolladas en 1950s para mejorar la precisión. Los dispositivos de medición que dependían del contacto físico con el globo ocular generalmente proporcionaban mediciones muy sensibles pero su inconveniente obvio era el requisito invasivo de llevar la lente de contacto. Los llamados rastreadores oculares no invasivos (también llamados remotos) normalmente se basaban en la medición de características visibles del ojo, por ejemplo, la pupila, límite iris-esclerótica o un reflejo corneal. Estas técnicas implican a menudo análisis manual o automático (basado en el ordenador) de grabaciones de vídeo de los movimientos oculares, ya sea off-line o en real-time. La disponibilidad de hardware de mayor calidad y rápido en el procesamiento de imágenes, ha facilitado el desarrollo de sistemas de seguimiento de ocular basados en video en tiempo real.

Electrooculograma (EOG)

El electrooculograma es el método más aplicado para el registro de los movimientos del ojo. Se basa en la medición de las diferencias de potencial eléctrico de la piel mediante los electrodos que se colocan alrededor del ojo. Esta técnica mide los movimientos oculares con relación a la posición de la cabeza, por lo tanto, no es adecuada para mediciones del punto de mirada a menos que también se mida la posición de la cabeza.

Lentes de contacto escleral/Bobina de búsqueda

Es uno de los métodos más precisos de medición del movimiento del ojo ya que implica asignar un objeto de referencia mecánica u óptica montado sobre una lente de contacto que a continuación, se usa directamente sobre el ojo. Las primeras grabaciones (Young and Sheena, 1975) utilizaron un anillo directamente sobre la córnea. Esta técnica evolucionó utilizando lentes de contacto modernas. La lente de contacto es necesariamente grande ya que se extiende sobre la córnea y la esclerótica. Varios dispositivos mecánicos u ópticos se han unido a la lente, el más conocido, la bobina de alambre que utiliza un campo electromagnético. Una imagen de la bobina incrustada en una lente de contacto se muestra en la imagen inferior. Aunque la bobina escleral es el método de medición del movimiento del ojo más preciso, también es el método más intrusivo. La inserción de la lente requiere cuidado y práctica. Además, el uso de la lente produce molestias al individuo. Este método también mide la posición del ojo con relación a la cabeza, por lo tanto, tampoco es adecuado para medición del punto de mirada.

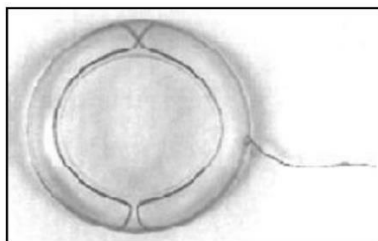


Ilustración 5: Lente de contacto con bobina de alambre. Imagen de: (Boleas-aguirre et al., 2007).

Foto-oculografía (Photo-oculography, POG) y video-oculografía (Video-oculography, VOG)

Esta categoría agrupa una amplia variedad de técnicas de registro del movimiento del ojo que implican la medición de características distinguibles de los ojos bajo rotación-translación, por ejemplo, la forma de la pupila, la posición del limbo (el límite iris-esclerótica) y los reflejos corneales de una fuente de luz dirigida (normalmente infrarroja). Aunque tienen diferente enfoque que las anteriores, estas técnicas no proporcionan la medición del punto de mirada. La medición de las características oculares proporcionadas por estas técnicas se puede, o no, hacer de forma automática y puede implicar una inspección visual de los movimientos oculares registrados (típicamente grabados en vídeo). La evaluación visual realizada manualmente (por ejemplo, paso a paso a través de cada uno de los fotogramas del video), puede ser extremadamente tediosa y propensa a errores y, además, está limitada por la tasa de muestreo temporal del dispositivo de vídeo.

Reflexión corneal basada en vídeo

Aunque las técnicas anteriores son adecuadas, en general, no proporcionan una medición del punto de mirada. Para obtener esta medida existen dos opciones: fijar la cabeza de manera que

la posición del ojo en relación a la cabeza y el punto de mirada coincidan, o medir múltiples características oculares con el fin de eliminar la ambigüedad del movimiento de la cabeza de la rotación de los ojos. Dos de estas características son el reflejo corneal (de una fuente de luz, por lo general, infrarroja) y el centro de la pupila (véase ilustración 6).



Ilustración 6: Ejemplo de reflejo corneal con una fuente de luz infrarroja. Imagen de: <http://publicacionesmedicina.uc.cl/ManualSemiologia/220ExamenOjos.htm>

Los rastreadores oculares basados en vídeo utilizan cámaras relativamente baratas y hardware de procesamiento de imágenes para calcular el punto de mirada en tiempo real. El aparato puede estar montado en la mesa o sobre la cabeza. La óptica de los dos suele ser esencialmente idéntica, con la excepción de tamaño para que el montaje sobre la cabeza sea más cómodo.

El reflejo corneal de la fuente de luz (típicamente infrarroja) se mide en relación a la localización del centro de la pupila. Los reflejos corneales son conocidos como las **reflexiones Purkinje**, o imágenes de Purkinje (Crane, 1994). Debido a la construcción del ojo, se forman cuatro reflexiones Purkinje, como se muestra en la ilustración inferior. Los rastreadores oculares basados en vídeo localizan típicamente la primera imagen de Purkinje. Con los procedimientos de calibración adecuados, estos rastreadores oculares son capaces de medir el punto de mirada sobre una superficie posicionada adecuadamente (plano perpendicular) en la que se muestran los puntos de calibración.

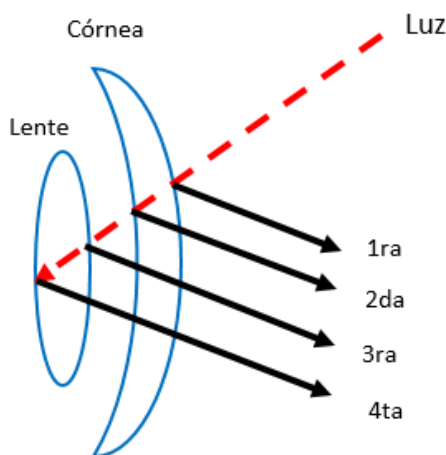


Ilustración 7: Reflexiones de Purkinje.

Las posiciones relativas aproximadas de la pupila y primeras reflexiones Purkinje se muestran gráficamente en la ilustración 8. La reflexión Purkinje se muestra como un pequeño círculo blanco en las proximidades de la pupila, representada por una elipse negra. Debido a que la fuente de luz de infrarrojos se coloca generalmente en alguna posición fija con respecto al ojo, la imagen de Purkinje es relativamente estable, mientras que el globo ocular y, por lo tanto, la pupila, gira en su órbita. Los llamados rastreadores oculares de V generación también miden la cuarta imagen de Purkinje (Crane and Steele, 1985). Mediante la medición de la primera y cuarta

reflexiones Purkinje, la imagen dual-Purkinje (DPI) de estos rastreadores separa los movimientos oculares de translación y rotación. Desafortunadamente, aunque el sistema de seguimiento ocular DPI es bastante preciso, para una mayor precisión puede ser necesaria la estabilización total o parcial de la cabeza.

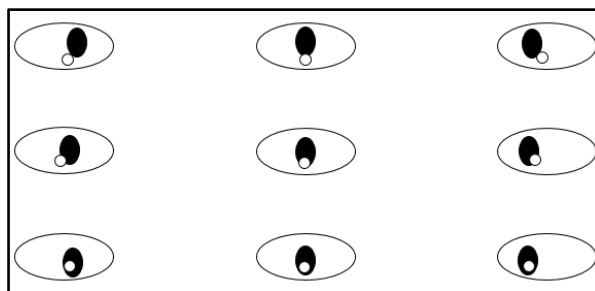


Ilustración 8: Posiciones relativas de la pupila con las primeras reflexiones de Purkinje.

2.4.2. Métricas y parámetros para el movimiento ocular

El seguimiento ocular proporciona información valiosa sobre el comportamiento ocular del usuario con el uso de dos medidas principales: la fijación y los movimientos sacádicos o las sacadas. Estas dos medidas se pueden utilizar de muchas maneras para analizar los aspectos particulares del comportamiento ocular. (Ehmke and Wilson, 2007) revisaron algunas de estas métricas (fijación, sacadas, trayectoria de exploración y mirada) y el problema de usabilidad o proceso cognitivo implicado en cada una. (Poole and Ball, 2005) proporcionan una guía práctica sobre el uso de algunas técnicas y (Moacdieh and Sarter, 2012) clasificaron las métricas de seguimiento ocular en tres categorías: métodos cuantitativos, cualitativos y combinación de ambos. También destacan (Jacob and Karn, 2003) que revisaron los estudios de usabilidad que utilizan seguimiento ocular y las métricas utilizadas en esos estudios.

En este apartado, se revisan posibles parámetros del movimiento ocular que pueden ser utilizados en los estudios de recuperación de información relativos al comportamiento ocular de los usuarios.

AOI, Area of Interest (Área de interés)

Un área de interés (AOI) es una región o elemento de una pantalla que permite a los investigadores medir la cantidad de atención que un usuario dedica sobre una porción exacta definida con precisión. Varios componentes del movimiento del ojo se pueden medir utilizando AOI, entre ellos, la primera mirada a un AOI o la frecuencia de miradas.

Por otra parte, los AOIs pueden medir varios parámetros de fijación: el número total de las fijaciones, la duración de la fijación, la primera fijación, orden de fijación y frecuencia. Los eventos básicos de los AOI son los hits, *dwell time* (traducido como “tiempo de permanencia” en un AOI) y las transiciones (movimientos ocular de uno a otro AOI) (Holmqvist et al., 2011). Una de las principales aplicaciones de los AOIs son los estudios del comportamiento visual de los usuarios con la finalidad de identificar detalles de su comportamiento ocular al navegar en una página web.

La fijación y sacadas/movimientos sacádicos

Las medidas del movimiento ocular evalúan la localización del ojo y la atención dedicada a una sola porción o toda una región de la pantalla. Los principales datos que el seguimiento ocular captura para representar la localización de la mirada de un usuario en la pantalla se divide en

dos tipos: las **fijaciones** (una serie de puntos de la mirada mantenidos en una dirección constante mientras que el individuo está observando un objetivo estacionario); y **sacadas** (movimientos oculares rápidos entre fijaciones). Una fijación es la duración de tiempo de visualización dedicado a un objetivo particular localizado en el rango foveal del ojo humano, mientras que los movimientos sacádicos conectan fijaciones.

El movimiento del ojo puede ser analizado mediante el uso de muchas de las medidas cuantitativas. La mayoría de estas medidas cuantitativas se revisan en este apartado y, (Goldberg and Kotval, 1999) y (Poole and Ball, 2005) también proporcionan una amplia revisión. Por ejemplo, las fijaciones oculares que proporcionan una visión más profunda de la atención de los usuarios se pueden medir de varias maneras: tiempo de la primera fijación, duración de la fijación y el número total de las fijaciones. Estas medidas numéricas desempeñan un papel significativo en la interpretación del comportamiento ocular del usuario. Además, estas medidas proporcionan diferentes explicaciones de la conducta: por ejemplo, una frecuencia más alta de fijación en un objeto particular indica un objeto importante, mientras que una larga duración de la fijación sugiere una dificultad para procesar la información. (Goldberg and Kotval, 1999) investigan estas medidas en profundidad y concluyen que las medidas son indicios de la conducta de búsqueda del usuario, categorizándolas en búsqueda global, búsqueda local y procesamiento.

Los rangos de sacadas/fijación proporcionan una indicación del comportamiento del usuario, es decir, de si un usuario está procesando (fijación), o buscando (sacadas). Por lo tanto, un mayor número de sacadas indica un comportamiento de búsqueda (Goldberg and Kotval, 1999; Liversedge and Findlay, 2000; Poole et al., 2004). La eficiencia puede ser medida por la densidad espacial de fijación donde las fijaciones más cercanas sugieren que un usuario está encontrando información interesante.

Por otro lado, estas métricas se pueden emplear para producir más métricas interesantes tales como el número total de las fijaciones (Goldberg and Kotval, 1999), el número total de fijación en cada AOI (Cutrell and Guan, 2007; Poole et al., 2004), total/media del tiempo de fijación (Cutrell and Guan, 2007; Kammerer and Gerjets, 2010) y el número de fijaciones de usuarios en un determinado AOI (Joachims et al., 2005).

Heatmaps (Mapas de calor) y Gazeplots (Gráficos de mirada)

Los datos de seguimiento ocular pueden representar gráficamente la atención del usuario en una pantalla utilizando diversas técnicas, tales como un mapa de calor (gráfico que muestra los datos de la mirada en una matriz utilizando colores para representar la atención en la pantalla) y un gráfico de mirada (gráfico que representa la secuencia y el orden de los movimientos oculares y su duración). Un ejemplo de estos gráficos se muestra en las ilustraciones 9 y 10. Los mapas de calor nos permiten reconocer las zonas más vistas en pantalla proporcionando una indicación de los objetos más importantes o atractivos para el usuario. Los gráficos de mirada proporcionan información detallada sobre el comportamiento de búsqueda del usuario, tales como primeras fijaciones, la duración de visualización y sus localizaciones.



Ilustración 9: Gráfico de mirada. Imagen de Flickr: <https://www.flickr.com/photos/rosenfeldmedia/10910760393>

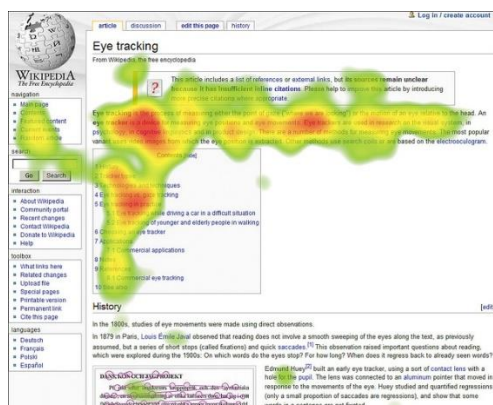


Ilustración 10: Mapa de calor: los colores más "cálidos" representan una elevada concentración de miradas y los colores más "suaves", menos concentración de miradas. Imagen de Flickr: <https://www.flickr.com/photos/rosenfeldmedia/10910197294>

Scan-Paths (Trayectorias/rutas de exploración)

Un Scan-Path es una trayectoria/ruta observada de las secuencias de movimiento del ojo (fijaciones y sacadas) a través de una pantalla. Las trayectorias de exploración pueden proporcionar información valiosa sobre el comportamiento de búsqueda de información y los estilos cognitivos, incluyendo el esfuerzo mental de los usuarios. La investigación de las características de las trayectorias de exploración puede dar buenas indicaciones sobre la interacción del usuario con los componentes informativos y la efectividad de tales componentes. (Poole and Ball, 2005) y (Goldberg and Helfman, 2010) discuten varias métricas para analizar cuantitativamente las trayectorias de exploración y sus métodos de interpretación, tales como la duración de la trayectoria de exploración y su longitud.

- **Longitud de la trayectoria de exploración:** Las trayectorias de exploración consisten en muestras de la mirada, cada una de las cuales tiene coordenadas en la pantalla, por lo que, el conteo de las distancias entre las muestras de la mirada nos proporcionará la longitud de la trayectoria de exploración.
- **Duración de la trayectoria de exploración:** El número total de puntos de la mirada (n) multiplicado por la duración de la mirada (0.017 segundos) proporciona la duración de

la trayectoria de exploración, mientras que para secuencias de sacadas y fijaciones, la duración de la trayectoria de exploración es la suma de las duraciones de las fijaciones y las sacadas (Goldberg and Kotval, 1999).

En el trabajo (Goldberg and Helfman, 2010) se propone una técnica para identificar automáticamente las trayectorias de exploración con el fin de estudiar las estrategias de navegación del usuario. Su estudio ofrece la oportunidad de analizar las trayectorias de exploración cualitativamente.

Tasa de transición (regresión)

La tasa de transición es un indicador útil sobre todo para la visión libre, donde se examina la dirección de la sacada (Ponsoda et al., 1995). Las AOIs nos permiten observar la tasa de transición entre los componentes informativos (frecuencia de los movimientos oculares entre AOIs), donde una mayor tasa de transición indica una gestión menos eficiente entre estos componentes (Jacob and Karn, 2003). En otras palabras, un movimiento de la mirada adelante y hacia atrás indica que el usuario no está seguro acerca de su búsqueda o sobre la información presentada (Goldberg and Kotval, 1999)

Otras métricas

Existen otras métricas que también se pueden obtener del análisis del seguimiento ocular:

- ***Densidad espacial***
- ***Dilatación de la pupila***
- ***Tasa de parpadeo***

La densidad espacial determina la búsqueda del usuario, de manera que los puntos de mirada alejados en el espacio indican búsqueda ineficiente mientras que pequeñas muestras de puntos de mirada cercanos reflejan una búsqueda eficiente.

La dilatación de la pupila y la tasa de parpadeo también se puede obtener del seguimiento ocular, y los estudios muestran que estas métricas pueden usarse para indicar la carga de trabajo cognitivo (Bailey et al., 2007; King, 2009). Una carga de trabajo cognitivo inferior se puede identificar por una frecuencia de parpadeo baja. Por el contrario, una mayor tasa de parpadeo es signo de estrés y exceso de trabajo (Poole and Ball, 2005). Por desgracia, el tamaño de la pupila y el parpadeo pueden ser influenciados por muchos factores tanto externos (fuente de luz utilizada) como propios del usuario (medicación, ingesta de sustancia activas como anabolizantes u otros.). Por este motivo, pocos estudios aplican exclusivamente estas métricas en la investigación del seguimiento ocular.

2.4.3. Calidad del seguimiento ocular

La calidad de seguimiento ocular se debe a la configuración mecánica y detección de la pupila, pero también a otros factores como los siguientes (Drewes, 2010):

- La precisión (influenciado por la anatomía del ojo, incluyendo los músculos y los sensores nerviosos).
- El filtrado de bajo nivel
- El tipo de software de aplicación unido al seguimiento ocular para la evaluación y visualización de los datos recopilados.

Además, la calidad del seguimiento ocular puede verse influenciada por la resolución (tasa de fotogramas de un video), la latencia (retardo en la captación de los datos) y la robustez (impacto de la luz y las gafas de los usuarios o lentes de contacto), entre otros.

2.4.4. Limitaciones del seguimiento ocular

Aparte del coste relativamente alto del hardware de seguimiento ocular, hay algunas limitaciones en las medidas de movimiento del ojo debido a problemas de usabilidad y dificultades con algunas de las técnicas de seguimiento. Algunas de estas limitaciones están relacionadas con la compleja correlación entre los movimientos oculares y el procesamiento cognitivo. Otras son atribuidas a los algoritmos de movimiento del ojo y el software utilizado por los fabricantes del rastreador ocular.

Falta de estandarización global

Los términos para las medidas y propiedades de los rastreadores oculares están lejos de ser uniformes por una variedad de razones. El software del fabricante, por ejemplo, puede causar una variación en la terminología (Duchowski, 2007; Holmqvist et al., 2011). Otra causa de confusión es que muchos nombres se derivan de diferentes áreas de investigación. Por ejemplo, en la lectura, la duración de la mirada es la cantidad de atención dedicada a un particular AOI (también denominada duración de la fijación), sin embargo, en la investigación de factores humanos esta medida se llama tiempo de permanencia (*dwell time*) (Green, 2002; Horrey and Wickens, 2007)). Esta similitud en conceptos con terminología diferente hace que los nuevos estudios en los que se realiza una comparación entre las investigaciones anteriores se conviertan en un proceso largo y laborioso, que se solucionaría con una normalización en la terminología.

Uso de diferentes parámetros del algoritmo de detección

Muchos trabajos de investigación muestran los resultados de sus análisis utilizando datos de seguimiento ocular pero solo un pequeño número de estos trabajos describen los parámetros del algoritmo de detección que se utilizan para definir las fijaciones y sacadas de sus datos. El uso de valores ligeramente diferentes para los parámetros del algoritmo de detección da lugar a resultados distintos. Este hecho hace que los investigadores no puedan comparar fácilmente los diferentes estudios lo que supondría un gran avance y facilidad para posibles nuevos estudios.

La visión periférica

El seguimiento ocular sólo puede captar el punto de mirada, la posición del ojo en la pantalla. Esto no incluye la visión periférica (área más grande que rodea el punto específico en el que el ojo está mirando) que funciona a una resolución más baja. Teniendo en cuenta la investigación disponible no se ha encontrado ningún estudio que investigue detalladamente los efectos de la visión periférica en el análisis de seguimiento ocular. Sin embargo, en términos generales, los usuarios no pueden leer o ver un objeto para extraer información sin ver claramente ese objeto. (Kelly and Cool, 1994) investigaron la diferencia en la capacidad del usuario en el reconocimiento de palabras entre la visión central y periférica. Encontraron que un usuario requiere de dos a cuatro veces la cantidad de tiempo dedicada en la visión central para reconocer una palabra frecuente en la visión periférica.

2.5. Aplicaciones

Aunque los orígenes de esta tecnología comenzaron a finales del siglo XVIII, las aplicaciones más renombradas y útiles han aparecido en los últimos 10 años, cuando los avances tecnológicos han permitido generalizar su uso. Este hecho ha dado lugar a que los rastreadores oculares modernos puedan emplearse no solo en laboratorios sino también en hogares, colegios, empresas, etc. Gran variedad de entornos donde se está empezando a convertir en un elemento imprescindible.

Los diferentes usos de la tecnología de seguimiento ocular han permitido dividir las aplicaciones desarrolladas en dos categorías, una **pasiva o de diagnóstico** y otra **activa o interactiva** (Duchowski, 2007) . En la primera, se incluyen las aplicaciones relacionadas con análisis y diagnóstico. En este caso, el seguimiento ocular proporciona la evidencia objetiva y cuantitativa de los procesos relacionados con la visión y la percepción del usuario. En la categoría activa, los rastreadores oculares sirven como un dispositivo de interacción con el ordenador. En este caso, la técnica es particularmente beneficiosa en pantallas grandes y en situaciones donde el usuario sufre alguna discapacidad que dificulta la movilidad de sus manos.

A continuación, se comentan algunas de las principales áreas de aplicación en las que ya se utiliza los rastreadores oculares:

- **Investigación científica.** La investigación científica es el área por excelencia. Las soluciones de seguimiento ocular en este ámbito permiten el análisis de los procesos cognitivos, del comportamiento humano y de la atención visual con aplicación en estudios de neuropsicología, oftalmología, lingüística, interacción persona-ordenador, psicología cognitiva y experimental, etc.
- **Investigación de mercados.** Es uno de los sectores en auge actualmente debido a que el seguimiento ocular ofrece métodos únicos para entender las respuestas de los consumidores y el comportamiento de los usuarios. Esta tecnología se puede aplicar para validar la distribución de los productos, hacer un test sobre el embalaje, validar cuestionarios o correos publicitarios, etc.
- **Usabilidad y experiencia del usuario.** Los test de usabilidad y de experiencia del usuario en sitios web representa la aplicación más habitual de esta tecnología en el sector comercial. En los últimos años, el seguimiento ocular se ha convertido en un método crucial para la realización de pruebas de usabilidad no solo de páginas web sino también de software, juegos de ordenador y TV interactiva, entre otros.
- **Herramientas de interacción humano-ordenador para discapacitados.** Se trata de una de las aplicaciones más significativas del seguimiento ocular. Dentro del área HCI, se están desarrollando multitud de aplicaciones y mejoras que permiten al usuario mover el puntero del ratón con la mirada con gran fiabilidad.
- **Estudios de ergonomía y HCI.** Conocidas empresas de aeronáutica utilizan la tecnología de seguimiento ocular en sus estudios de ergonomía con objeto de verificar la mejor posición de los paneles de mandos, especialmente para situaciones de emergencia. Con un objetivo similar lo están utilizando los fabricantes de automóviles.

Otros usos dentro de esta temática son:

- Control del tráfico aéreo y operadores de radar.
- Objetivos estratégicos, que incluyen test comparativos, pruebas de usabilidad y de mejora de la competitividad de la empresa.
- Estudios sobre conducción vial.
- Definición de pautas para el desarrollo de sistemas de e-learning.

- **Mejora de rendimiento deportivo.** Dentro de este ámbito de aplicación menos conocido, destaca su uso en baloncesto donde se ha utilizado con el objetivo de entrenar los lanzamientos a canasta ayudando al jugador a fijarse en determinadas zonas del tablero mejorando así su tiro.
Por otro lado, el análisis fisiológico del movimiento ocular, en donde se calculan características como los tiempos de reacción, es un aspecto muy útil para el estudio de los reflejos de atletas profesionales.
- **Área clínica.** En este campo, ya hay numerosos hospitales que lo utilizan para analizar el movimiento ocular, realizar diagnósticos clínicos y corregir defectos relacionados con distintos tipos de patologías.
- **Desarrollo de juegos avanzados de ordenador.** En el sector de los videojuegos, la tecnología de seguimiento ocular ofrece muchas posibilidades creativas. Los rastreadores oculares se convierten en una herramienta de interacción nueva y original. Además, esta tecnología también puede permitir la optimización de procesos de renderizado en tiempo real en interfaces tridimensionales.
- **Diagnóstico de dificultades de aprendizaje con fines pedagógicos.** Es un área de aplicación más específica del seguimiento ocular. Sin embargo, se pueden distinguir varias aplicaciones, por ejemplo, cuando se lee un texto en un lenguaje distinto al que se está acostumbrado, el sistema detecta dificultad en la lectura caracterizado por fijaciones más duraderas y patrones repetitivos. Estas características también se trasladan a la identificación de barreras de acceso a la información para casos de discapacidad cognoscitiva.

En el contexto de estos ámbitos, la tecnología de seguimiento ocular tiene un enorme futuro en todo lo relacionado con los dispositivos de realidad aumentada en los que se pueden tomar decisiones en función de la actividad ocular del usuario.

2.6. Dispositivos actuales

TobiiPro es una de las empresas más importantes en la utilización del seguimiento ocular en diferentes ámbitos, entre ellos, marketing, psicología, educación, neurociencia, investigación clínica, etc. En su página web (<http://www.tobiiipro.com/>) se especifican muchos de los proyectos en los que actualmente están trabajando. Dentro de sus productos, nos vamos a centrar en los dispositivos hardware de seguimiento ocular. En la tabla 3 y 4, se realiza una comparativa de las principales características de sus dispositivos actualizada a 2016. En esta tabla, también se incluye un dispositivo promocionado por otra de las empresas pioneras en el sector de dispositivos de bajo coste **TheEyeTribe** (<https://theeyetribe.com/>) que presume de tener muy buenas características en seguimiento ocular a un precio bastante inferior a sus competidores.

Como se aprecia en la tabla, los valores de la frecuencia de muestreo de mirada de los distintos dispositivos son muy diferentes, van desde 30 Hz de los modelos Tobii Pro X2-30 y Eye Tribe Tracker Pro a 300 Hz del modelo Tobii Pro TX300. Este último modelo es el que tiene menor latencia (< 10 ms) a diferencia de Tobii Pro X2-30 que alcanza 50 – 70 ms. También, es importante destacar que los modelos Tobii Pro TX300 y Tobii Pro T60 XL son sistemas integrados en el monitor mientras que el resto de dispositivos se pueden utilizar tanto para pantallas de ordenador como dispositivos portátiles del tamaño adecuado (ipads, tablets, etc.). Respecto a los datos recogidos por los distintos aparatos, los cinco primeros (pertenecientes a la empresa **TobiiPro**) almacenan la misma información. En cambio, el último dispositivo de la empresa **TheEyeTribe** proporciona información sobre la posición de la mirada en la pantalla, la posición 3D de los ojos y el diámetro de la pupila en mm.

TobiiPro no especifica el precio de ninguno de los dispositivos comentados en la tabla mientras que **TheEyeTribe** sí. No obstante, se ha intentado encontrar un precio orientativo de los dispositivos de **TobiiPro** y el más comentado en foros y redes sociales es que el precio de su modelo Tobii Pro X2-30 ronda los 1100 \$ por alquiler mensual y por compra, 20000 \$. En cambio, el precio del último modelo de **TheEyeTribe** se ha quedado por debajo de los 200 \$, con unas características mejoradas a su predecesor y una mayor precisión en la información proporcionada.

	Tobii Pro X3 120	Tobii Pro X2-30	Tobii Pro X2-60	Tobii Pro TX300	Tobii Pro T60XL	Eye Tribe Tracker Pro
Gaze sampling frequency	120 Hz	30 Hz	60 Hz	300 Hz	60 Hz	30 to 75 Hz
Gaze sampling variability	X	2 Hz	0.1 Hz	<0.3%	X	X
Accuracy	0.4°	0.4°	0.4°	0.4°	0.5°	0.5° – 1°
Precision	0.24°	0.32°	0.34°	0.14°	0.22°	X
Freedom of head movement	Width x height: 50 cm x 40 cm (19.7" x 15.7") @ 80 cm operating distance: 50 – 90 cm (19.6" – 35.4")	Width x height: 50 x 36 cm (20 x 14") @ 70 cm" operating distance: 40–90 cm (15.7–33.5")	Width x height: 50 x 36 cm (20 x 14") @ 70 cm" operating distance: 40–90 cm (15.7–33.5")	Width x height: 37 cm x 17 cm (15" x 7") @ 65 cm operating distance: 50 – 80 cm (20" – 31")	Width x height: 44 cm x 22 cm (17.3" x 8.7") @ 70 cm operating distance: 50 – 80 cm (20" – 31")	50cm x 30cm at 65cm distance With operating range 45cm – 75cm
Latency	< 11 ms	50 – 70 ms	< 35 ms	< 10 ms	< 33 ms	< 16 ms
Gaze recovery time	For blinks: immediate After lost tracking <100 ms	For blinks: immediate	For blinks: immediate	For blinks: immediate After lost tracking 10-165 ms	For blinks: <17 ms After lost tracking <300 ms	X
Recommended screen size	Up to 25" (16:9)	Up to 25" (16:9)	Up to 25" (16:9)	Integrated system, 23" monitor	Integrated system, 24" wide screen monitor	Up to 27"
Max gaze angles	X	X	X	35°	42°	X
Tracking technique	Binocular, dark and bright pupil tracking combination	Binocular, automatic tracking optimization (optimal selection of dark and bright pupil tracking)	Binocular, automatic tracking optimization (optimal selection of dark and bright pupil tracking)	Binocular, dark pupil tracking	Binocular, automatic tracking optimization (optimal selection of dark and bright pupil tracking)	X

Tabla 3: Comparativa de Eye Trackers.

	Tobii Pro X3 120	Tobii Pro X2-30	Tobii Pro X2-60	Tobii Pro TX300	Tobii Pro T60XL	Eye Tribe Tracker Pro
Data output (for each eye)	Timestamp Eye position Gaze point Pupil diameter Validity code	Timestamp Eye position Gaze point Pupil diameter Validity code	Timestamp Eye position Gaze point Pupil diameter Validity code	Timestamp Eye position Gaze point Pupil diameter Validity code	Timestamp Eye position Gaze point Pupil diameter Validity code	Binocular gaze data (x/y screen coordinate) 3D eye position Pupil diameter in mm
Price	X	1100\$ per month to hire and 20000\$ to purchase	X	X	X	199 \$

Tabla 4: Comparativa de Eye Trackers (Continuación).

2.6.1. Coste de los dispositivos de seguimiento ocular

El elevado coste de la mayoría de los rastreadores oculares que se fabrican en la actualidad es uno de los aspectos más importantes en el uso de esta tecnológica. La creación de rastreadores oculares de bajo coste favorece el uso y desarrollo de aplicaciones de seguimiento ocular haciendo así que aumente su popularidad y uso en una mayor cantidad de ámbitos. Además, la incorporación de dispositivos de seguimiento ocular en móviles y tablets, dispositivos utilizados diariamente por todos, también ayuda a que su popularidad vaya en aumento fomentando aún más su uso.

Por este motivo, uno de los principales aspectos que se ha tenido en cuenta en la realización de este trabajo, ha sido la búsqueda y elección de un rastreador de bajo coste. El dispositivo seleccionado ha sido uno de los modelos de *TheEyeTribe*, con la finalidad de que la aplicación desarrollada pueda ser accesible a todos mediante el uso de un dispositivo con un precio reducido.

2.7. Dislexia

En este apartado y en los siguientes se describen brevemente varias de las patologías que pueden ser estudiadas mediante la aplicación desarrollada en este TFM. Se comienza comentando las principales características de la dislexia y su relación con los patrones de lectura. A continuación, se habla del trastorno de déficit de atención e hiperactividad y, finalmente, se tratarán las enfermedades neurodegenerativas más conocidas.

2.7.1. Definición

La palabra dislexia viene del griego “*dis*” que significa dificultad y “*lexia*” que significa palabra. Por lo tanto, uniendo ambos significados, la dislexia denota la dificultad con las palabras. Esta condición ha sido estudiada y definida desde hace mucho tiempo (Perdesen, 2008). La definición más común y aceptada es la de (Crichtley, 1970) donde se define la dislexia de la siguiente manera:

“La dislexia es un trastorno que se manifiesta por la dificultad para aprender a leer, a pesar de la instrucción convencional, inteligencia adecuada y oportunidades socioculturales”.

La dislexia es una discapacidad de aprendizaje específica de origen neurológico. Se caracteriza por la dificultad para reconocer una palabra con precisión y/o fluidez y por las deficiencias en las habilidades de ortografía y descifrado. Afecta a las personas que tienen dificultades al leer, en concreto, dificultades en aprender a leer y en comprender lo que han leído. Existen una gran variedad de hipótesis sobre la causa de estas dificultades, la más aceptada es la llamada **conciencia fonológica** (Perdesen, 2008). En ella, el proceso de lectura se puede dividir en dos partes, la **parte de descifrado** y la **parte de comprensión**. Esta última, se basa en las experiencias personales y en la educación de cada persona. En cuanto a la parte de descifrado, hay dos tipos de procesos:

- **Descifrado ortográfico.** Consiste en decodificar una palabra por su representación gráfica con el fin de obtener su significado. El lector debe de conocer la palabra, es decir, debe tener una “huella” ortográfica de esa palabra en su memoria.
- **Descifrado fonológico.** Consiste en decodificar una palabra mediante su división en partes más pequeñas. Estas partes son descifradas fonológicamente, es decir, las partes se decodifican por su sonido. A continuación, estas partes se combinan entre sí para dar lugar a la decodificación de la palabra. Este descifrado es útil para decodificar palabras desconocidas a diferencia del descifrado ortográfico.

El lector también puede basarse en el contexto del texto. Por ejemplo, puede confiar en la semántica, pistas en el texto que ayudan a describir una palabra; y también, en la sintaxis, que le puede ayudar a identificar el tipo de palabra.

Para una persona no disléxica, estos procesos de decodificación son automáticos y la lectura no es un problema. En cambio, para una persona con dislexia, el principal problema de los explicados anteriormente son los procesos de descifrado. Además, las personas con dislexia parecen tener mala conciencia fonológica.

2.7.2. Estadísticas de dislexia

Dependiendo del idioma, las estimaciones sobre la población con dislexia son diferentes. La Academia Nacional de Ciencias establece que entre 10 a 17,5% de la población en EEUU tiene dislexia (Interagency Commission on Learning Disabilities, 1987). El modelo (Shaywitz et al., 1992) predice que el 10,8% de los niños de habla inglesa tienen dislexia mientras que en (Katusic

et al., 2001), las tasas varían desde el 5,3% hasta el 11,8%. En función de la fórmula utilizada, (Brunswick, 2010) estima que el 10% de los hablantes ingleses y el 3,5% de los hablantes italianos son disléxicos.

Por otro lado, para los hablantes españoles los datos son más escasos: (Galván Gómez, 2010) habla de un 7,5% de los niños en edad escolar en Perú, (Carrillo et al., 2011) determinan que el 11,8% de los niños en edad escolar examinados en Murcia (España) presentan dificultades asociadas a la dislexia, y (Jiménez et al., 2009) informan de un 8,6% de la población de las Islas Canarias (España).

2.7.3. Dislexia dependiente del idioma

Una cantidad considerable de estudios confirman las bases biológicas de la dislexia con la excepción de la dislexia adquirida (Vellutino et al., 2004). Sin embargo, a pesar de su base neurocognitiva, los distintos casos de dislexia son variables y específicos de la cultura.

Esta variabilidad se debe a las diferentes ortografías del lenguaje en función de su grado de consistencia y regularidad. El inglés tiene una **ortografía opaca o profunda** en la que las relaciones entre letras y sonidos son inconsistentes y se permiten muchas excepciones. El inglés presenta al lector un reto mucho mayor en comparación con otros idiomas como el español. El español tiene un sistema alfabético más regular que contiene asignaciones entre letras y sonidos consistentes, es decir, una **ortografía transparente o poco profunda**. Por ejemplo, en el estudio realizado por Paulesu (Paulesu et al., 2001), los disléxicos italianos (ortografía transparente) obtuvieron mejores resultados en las tareas de lectura que los disléxicos ingleses y franceses (ortografía profunda). Por otro lado, la dislexia también se ha conocido con el término **discapacidad oculta** debido a la dificultad de su diagnóstico en los idiomas con ortografías profundas (Vellutino et al., 2004).

2.7.4. Tipos de dislexia

La dislexia más frecuente es la **dislexia de desarrollo**. También existe la **dislexia adquirida**, en la que los trastornos específicos de la lectura o escritura se producen después de una lesión cerebral. La dislexia es continua y puede tener distintos niveles de gravedad (Shaywitz et al., 1992). En cuanto a la dislexia de desarrollo, hay gran cantidad de artículos de investigación que hablan sobre posibles subtipos. En cambio, (Vellutino et al., 2004) revisaron cuatro décadas de estudios de la dislexia (desde los 70 a 2004) y decidieron no abordar las clasificaciones de la dislexia porque, según ellos,

"La investigación no ha sido fructífera en la mejora de nuestra comprensión de los subtipos de dislexia a nivel cognitivo, con pocos estudios que encuentren evidencias de relaciones entre subtipos y hallazgos biológicos o de intervención "

No obstante, la gran mayoría de investigadores están de acuerdo en diferenciar **tres tipos de dislexia: fonológica, de superficie y la dislexia profunda**. Sin embargo, la delimitación de estos tres tipos no está clara y sus síntomas se superponen (Friedman, 1996).

- La **dislexia fonológica** es un trastorno de la lectura que se caracteriza por un deterioro en la capacidad de lectura de las no - palabras (palabras que no tiene significado, no son conocidas o no han sido admitidas por ninguna institución lingüística).
- La **dislexia de superficie** se caracteriza por lectura pobre de palabras irregulares de baja frecuencia, junto con la lectura precisa de las no - palabras. Mientras que los disléxicos fonológicos utilizan una ruta de lectura visual (leen palabras a la vez), los disléxicos superficiales utilizan una ruta fonológica de lectura (reglas de conversión grafema-fonema).

Por otro lado, los disléxicos fonológicos recuerdan un vocabulario ortográfico y fonológico, en cambio, los disléxicos superficiales se encuentran con problemas cuando se utiliza las reglas de conversión grafema-fonema.

- Las personas con **dislexia profunda** presentan errores semánticos relacionados con la falta de recuperación de representación semántica, tales como las sustituciones de palabras completas, entre otros.

Aunque la clasificación de los tipos de dislexia se basa en modelos de lectura, todos los tipos implican errores de ortografía (Lyon et al., 2003).

Otro aspecto a tener en cuenta es que la clasificación comentada proviene de estudios realizados sobre población de habla inglesa que, como ya se ha comentado, se trata de una lengua con ortografía profunda. Este hecho hace que la dislexia superficial afecte a muchos procesos de lectura y escritura. En cambio, en ortografía transparente, este tipo de dislexia no supone impacto significativo en la vida diaria y sería difícil de diagnosticar.

2.7.5. Características de dislexia

Aunque no todos los tipos de dislexia son iguales ni tienen el mismo grado, algunas de las características más comunes de las personas disléxicas son las siguientes (Perdesen, 2008):

- **Dificultades para entender el texto que acaba de leer.** Para entender el texto que se lee, el proceso de descifrado debe realizarse correctamente. Como ya se ha comentado, las personas con dislexia tienen problemas para descifrar el texto que están leyendo, utilizando todos sus recursos cognitivos en el descifrado del texto y no en su comprensión. Por otra parte, las palabras no se descifran correctamente lo que conduce a más dificultades para comprender el texto. Además, es común que la persona con dislexia sustituya una palabra por otra mientras lee y no la corrija, haciendo que su comprensión del texto se base en palabras equivocadas.
- **Conjeturas en función del contexto.** A menudo, las personas disléxicas tratan de adivinar la fonología de la ortografía de una palabra desconocida mirando el contexto del texto.
- **Movimientos oculares no regulares.** Durante la lectura, las personas disléxicas hacen más regresiones que las personas sin dislexia debido a sus problemas de descifrado del texto. Se puede observar que mientras leen, los disléxicos leen mal algunas palabras y entonces, con el fin de corregirlos, vuelven hacia atrás. También, es común que tengan problemas para entender el texto por lo que hacen pausas y después, continúan, con el fin de tener una mejor comprensión.
- **Lectura apresurada.** Las personas con dislexia tienen problemas para seguir el ritmo de una frase y al tratar de seguirlo, cambian los tiempos y conjugaciones de verbos y también, reemplazan palabras por sinónimos u omiten otras palabras.

2.7.6. Dislexia y lectura

En base a los estudios realizados en los que participan personas con dislexia, éstas se pueden dividir en dos grupos (Perdesen, 2008):

- **Lectores analíticos.** Son aquellos que cometen un error durante la lectura y se corrigen a sí mismos. Por ejemplo, si leen mal una palabra, a continuación, se produce una regresión inmediata con el fin de corregir el error. Este hecho provoca un mayor número de regresiones y también, una lectura más lenta.
- **Lectores mecánicos.** Al contrario que los lectores analíticos, los lectores mecánicos no se corrigen a sí mismos cuando leen mal alguna palabra. Por ejemplo, si interpretan mal una

palabra o la omiten, no corrigen el error, aunque la frase “leída” no tenga ningún significado. Esto hace que la frecuencia de regresión sea menor y también, que la lectura sea más rápida.

La trayectoria del trazo de lectura de las personas con dislexia (tanto lectores analíticos como lectores mecánicos) tiene un comportamiento similar. Este comportamiento es diferente del comportamiento de lectura de las personas sin dislexia. Los principales rasgos de este comportamiento son los siguientes (Perdesen, 2008):

- **Regresiones frecuentes.** La mayoría de las veces, los movimientos oculares no son regulares lo que conduce a una alta frecuencia de regresiones. Estas regresiones se realizan para corregir una mala lectura o para entender lo que se acaba de leer.
- **Confusión de palabras similares o letras similares.** Pueden tener problemas para percibir y recordar las letras, por ese motivo, pueden mezclarlas. Lo mismo ocurre en palabras que son similares.
- **Dificultades para leer textos complejos o largos.** Principalmente, personas que tengan problemas de memoria a corto plazo.
- **Descifrado lento.** Los disléxicos tienen la tendencia a tener una trayectoria de lectura lenta. De hecho, debido a que tienen problemas para leer y descifrar la información del texto, pasan más tiempo leyendo. Esto se traduce también en una mayor duración de fijación.
- **Suma y omisión de palabras.** Al leer un texto, es frecuente que añadan u omitan palabras.
- **Palabras no frecuentes.** Tienen algunas dificultades cuando se encuentran con palabras no frecuentes. En cambio, leen las palabras más frecuentes con menos dificultad.
- **Pausas.** A menudo, hacen pausas de duración anormal entre palabras. La mayoría de las veces, estas pausas las producen los lectores analíticos, pero también, puede ocurrir con los lectores mecánicos cuando se encuentran con palabras difíciles. Estas pausas largas indican directamente un error de lectura. También, puede ocurrir que las pausas ocurran con el fin de tener tiempo para ir hacia atrás y entender lo que se lee. Ambos tipos de lectores a menudo utilizan onomatopeyas como “hmmm” o “ehm” con el fin de llenar el hueco producido por estas pausas.
- **Dificultades con palabras largas.** Es frecuente que cuando una palabra es particularmente larga, tengan problemas para leerla. La relación entre la frecuencia de una palabra mal leída y la longitud de la palabra parece ser proporcional. Sin embargo, la composición de la palabra en vocales o en consonantes no influye en esta relación. También, se observa que las sílabas iniciales sí son leídas correctamente, a diferencia de la parte final de la palabra.

2.7.7. Recomendaciones para la presentación de texto a personas disléxicas

De acuerdo con una encuesta realizada por (McCarthy and Swierenga, 2010), los estudios sobre la dislexia y accesibilidad son escasos en comparación con otros grupos de usuarios con necesidades especiales. (de Santana et al., 2012) explican que esta falta de consideración explícita de las particularidades de dislexia en las directrices hace que las necesidades de los usuarios con dislexia no se cumplan. (McCarthy and Swierenga, 2010) señalan que los principales problemas experimentados por los usuarios disléxicos cuando leen en la pantalla son, entre otros, los colores pobres, texto demasiado pequeño y un lenguaje complicado. De acuerdo con (Paciello, 2000) y (Smythe, 2010) la investigación sobre la dislexia y la accesibilidad del texto es escasa pero lo suficientemente fuerte como para orientar las prácticas de diseño más accesibles para la dislexia.

La mayoría de las recomendaciones sobre la lectura de la pantalla provienen de las asociaciones de dislexia, estudios educativos y estudios de usuarios. Los estudios que tienen en cuenta la dislexia desde el enfoque de la accesibilidad web se centran principalmente en las características de diseño de una página web, como formatos de texto especiales para usuarios con dislexia. Sin embargo, las recomendaciones de contenido son escasas (McCarthy and Swierenga, 2010). Los estudios educativos se centran más en el contenido del texto. Por otro lado, las recomendaciones de las asociaciones y los estudios de accesibilidad prestan más atención a la presentación del texto.

Presentación de texto

A continuación, se presentan las recomendaciones para una presentación del texto adecuada a los usuarios con dislexia y las referencias utilizadas para tales conclusiones:

- **Tipo de letra.** Hay recomendaciones de la Asociación Británica de Dislexia (British Dyslexia Association, 2012), (Evelt and Brown, 2005), (Lockley, 2002) y páginas web especializadas. Hay estudios de usuarios de (De Leeuw, 2010) y (Sykes, 2008), así como, fuentes diseñadas específicamente para las personas con dislexia: *Sylexiad* (Hillier, 2008), *Dyslexie* (De Leeuw, 2010), *Read Regular* y *OpenDyslexic*. Tras analizar estos y otros documentos relacionados con el tema, (Rello, 2014) concluye que las mejores fuentes para las personas con dislexia son *Helvetica*, *Courier*, *Arial*, *Verdana* y *Computer Modern Unicode*. Por el contrario, *Arial It* debe evitarse ya que disminuye la legibilidad. Por otro lado, los tipos de fuentes *Sans serif*, *romanas* y *de espacio fijo* aumentaron el rendimiento de las personas con dislexia mientras que fuentes cursivas hicieron lo contrario.
- **Texto y colores de fondo:** (Bradford, 2011), la Asociación Británica de Dislexia (British Dyslexia Association, 2012) y (Rainger, 2012) recomiendan diferentes colores para las personas con dislexia. (Gregor and Newell, 2000) exploran en un estudio de usuarios diferentes combinaciones de colores. En cuanto a la escala de gris para el texto y el fondo se han encontrado las recomendaciones de (Tseng, 2012). De estos documentos se concluye los siguientes aspectos:
 - El texto negro sobre fondo blanco no se recomienda para personas con dislexia.
 - El texto escrito en gris oscuro podría mejorar la legibilidad de las personas con dislexia.
 - En (Tseng, 2012) se sugiere un fondo gris claro pero en las otras referencias, no garantiza una mejora en la legibilidad al utilizar este color.
 - En (Bradford, 2011) se recomienda evitar un contraste alto entre el color del texto y el fondo.
 - Los pares verde/marrón y azul/amarillo para texto y fondo, respectivamente, son los más recomendables para personas con dislexia según (Gregor and Newell, 2000)
- **Tamaño de la fuente:** El efecto del tamaño de la fuente se estudia en participantes con dislexia en (O'Brien et al., 2005) y (Dickinson et al., 2002). También hay recomendaciones por parte de la Asociación Británica de Dislexia (British Dyslexia Association, 2012), (Rainger, 2012), (Bradford, 2011) y (Zarach, 2012). Finalmente, se concluye que un tamaño de fuente mayor es mejor para personas con dislexia que tamaños menores. En algunos de los documentos comentados anteriormente eligen como tamaño recomendable 12 o 14 aunque en (British Dyslexia Association, 2012) y (Dickinson et al., 2002) recomiendan tamaños mayores (desde 22 a 26).
- **Separación/Espaciado:** En relación con el espaciado entre caracteres, hay un estudio de usuario por (Zorzi et al., 2012) y las recomendaciones de (Rainger, 2012) y (Pedley, 2006).

(Bradford, 2011) trata el espacio entre párrafos. (Rainger, 2012), (Pedley, 2006) y la Asociación Británica de Dislexia (British Dyslexia Association, 2012) dan recomendaciones para el interlineado.

- *Espaciado entre caracteres.* En (Pedley, 2006), se recomienda crear una distancia ligeramente mayor entre las palabras individuales y reducir el espaciado de las letras, de modo que las letras dentro de una palabra se encuentran más juntas. En cambio, (Rainger, 2012) sugiere tener gran espacio entre las combinaciones de letras. En cambio, el experimento de (Zorzi et al., 2012) llevado a cabo en el papel recomienda un mayor espacio entre caracteres lo que mejora el rendimiento de lectura de los niños con dislexia (velocidad de lectura y los errores de lectura)
- *Espaciado entre párrafos.* De acuerdo con (Bradford, 2011), los párrafos incluso cuando tienen una sola línea, siempre deben estar separados con una línea en blanco entre cada párrafo.
- *Espaciado entre líneas.* Se recomienda utilizar un interlineado de 1,5 a 2 (Rainger, 2012).
- **Ancho de columna:** Existen las recomendaciones de la Asociación Británica de Dislexia (British Dyslexia Association, 2012) y (Bradford, 2011) y el estudio de usuarios de (Schneps et al., 2013). La Asociación Británica de Dislexia (British Dyslexia Association, 2012) y (Bradford, 2011) recomiendan evitar las líneas largas (entre 60-70 caracteres) y columnas estrechas.

Contenido del texto

En este apartado se presentan las recomendaciones para el contenido del texto en relación con la dislexia.

- **Esquemas gráficos:** ya que las personas con dislexia son fuertes pensadores visuales, el uso de esquemas gráficos (mapas mentales) es ampliamente recomendado en estudios educativos (Chalkley et al., 2001; López Castro, 2010; Ramírez Sánchez, 2011; Weaver, 1978) ya que se ha encontrado que son beneficiosos para los lectores con esta discapacidad.
- **Palabras clave:** en la literatura relacionada con educación, destacar palabras claves es una estrategia de aprendizaje ampliamente recomendada (Weinstein and Mayer, 1986). Se anima a los estudiantes con dislexia y maestros a resaltar palabras clave para hacer más accesibles los textos (Peer and Reid, 2001; Hargreaves, 2007).
- **Paráfrasis verbales:** las personas con dislexia tienen dificultades especiales con palabras cortas (Cuetos and Valle, 1988) y funcionales (Morton, 1979; Temple, 1984; Wimmer, 1993; Patterson, 1995). Por lo tanto, el uso de paráfrasis verbales podría reducir el uso de tales palabras en la oración.
- **Frecuencia de palabra y longitud de palabra:** ambos parámetros están estrechamente relacionadas con las principales dificultades que encuentran las personas disléxicas, palabras muy largas y poco frecuentes (Cuetos and Valle, 1988; Wimmer, 1993; Simmons and Singleton, 2000; Rüsseler et al., 2003).
- **Expresiones numéricas:** las personas con dislexia son más propensas a tener problemas de aprendizaje en matemáticas (Landerl et al., 2004) debido a que la dislexia puede estar relacionada con la discalculia (dificultad para aprender los principios del cálculo originada por un problema cerebral que dificulta el uso del sistema simbólico). De hecho, las personas con dislexia encuentran problemas para reconocer y recordar tanto letras como números.

2.7.8. Dislexia en niños

En este apartado, se completan los comentarios realizados anteriormente sobre la dislexia centrándose en la dislexia en niños. Se recuerda que no todos los tipos de dislexia son iguales, por lo tanto, los aspectos comentados a continuación no se pueden aplicar a todos los niños con dislexia.

Las **principales características** de la dislexia en niños son:

- **Falta de atención.** Suelen presentar un alto grado de fatigabilidad debido al esfuerzo intelectual que tienen que realizar para superar las dificultades perceptivas específicas. Por esta causa, el aprendizaje de la lectura y la escritura le resultan poco interesantes y atractivos.
- **Desinterés por el estudio.** La falta de atención, unida a un medio familiar y escolar poco estimulante hacen que aumente el desinterés por las tareas escolares. Por estos motivos, su rendimiento y calificaciones escolares serán cada vez más bajos.
- **Inadaptación personal.** Algunos de los niños con dislexia, al no orientarse bien en el espacio y en el tiempo, se encuentra sin puntos de referencia o de apoyo presentando inseguridad y falta de estabilidad en sus reacciones.

En el **ámbito escolar**, la dislexia se manifiesta de una forma más concreta en las materias básicas de lectura y escritura. Según la edad del niño, la dislexia presenta unas características determinadas que se pueden agrupar en tres niveles de evolución. De modo que, aunque el niño disléxico supere las dificultades de un nivel se encuentra con las propias del siguiente. De esta forma, la reeducación hará que estas dificultades aparezcan cada vez más atenuadas o que incluso, lleguen a desaparecer con la rehabilitación. A continuación, se realiza un análisis de las distintas etapas por rango de edad.

- **Niños de edades comprendidas entre los 4 y los 6 años.** Esta etapa coincide con la etapa preescolar. Los niños están iniciándose en la escritura y en la lectura, pero como no se ha producido la adquisición total de éstas, los trastornos que presentan se harán patentes en el próximo nivel o en edades más avanzadas. En estas edades, las alteraciones se manifiestan más bien en el área del lenguaje, dentro de éstas podemos destacar:
 - Supresión de fonemas, por ejemplo "bazo" por "brazo".
 - Confusión de fonemas, por ejemplo "bile" por "dile".
 - Pobreza de vocabulario y de expresión junto con una comprensión verbal baja.
 - Inversiones, que pueden ser fonemas dentro de una sílaba o de sílabas dentro de una palabra. Por ejemplo: "pardo" por "prado".
 - Dificultad para distinguir colores, tamaños, formas...
- **Niños de edades comprendidas entre los 6 y los 9 años.** En este periodo, la lectura y la escritura ya deben estar adquiridas con un cierto dominio y agilidad. En esta etapa, el niño con dislexia se encuentra con más dificultades y pone más de manifiesto su trastorno. Las manifestaciones más corrientes en este periodo son:
 - Confusiones en aquellas letras que tienen una similitud en su forma y en su sonido, por ejemplo: "d" por "b", "p" por "q", "u" por "n", etc.
 - Dificultad para aprender palabras nuevas.
 - Inversiones en el cambio de orden de las letras, por ejemplo "amam" por "mama".
 - Omisión o supresión de letras, por ejemplo "comer" por "come".

- Sustitución de una palabra por otra que empieza por la misma sílaba o tiene sonido parecido.
 - Falta de ritmo en la lectura, saltos de línea o repetición de la misma.
 - Mezcla de letras minúsculas y mayúsculas.
- **Niños mayores de 9 años.** A partir de los 9 años, un niño con dislexia puede manifestar algunas de las siguientes características:
 - En el lenguaje, tienen dificultades para construir frases correctamente, y conjugar los tiempos verbales.
 - La comprensión y la expresión suelen ser bajas en comparación con el resto de niños de su misma edad.
 - La lectura suele ser mecánica, este hecho hace que tengan poco gusto por la lectura, debido al esfuerzo que les supone.
 - Presentan dificultades para manejar el diccionario.
 - En la escritura es frecuente la caligrafía es irregular y poco elaborada.

2.8. Déficit de atención e hiperactividad (TDAH)

2.8.1. Definición

El trastorno por déficit de atención con o sin hiperactividad, también conocido como TDAH, es un síndrome conductual, es decir, un trastorno del comportamiento que se caracteriza por una distracción de moderada a grave, periodos de atención breve, inquietud motora, inestabilidad emocional y conductas impulsivas (Michanie, 2004). El TDAH está dentro de la clasificación de trastornos mentales del APA (Asociación Americana de Psiquiatría) dentro del apartado de trastorno por déficit de atención y comportamiento perturbador (1994).

El TDAH es un trastorno neurológico, aunque, hoy en día, no se sabe exactamente cuál es la causa que lo provoca. Algunos científicos lo asocian a la falta de alguna de las sustancias químicas del cerebro, en concreto, los neurotransmisores que son los elementos químicos encargados de controlar la conducta (Asociación Americana de Psiquiatría, 2000).

Ya se han comentado los aspectos propios de este trastorno, los cuáles se pueden resumir en tres: **falta de atención, hiperactividad e impulsividad**. Estos comportamientos comienzan antes de que el individuo cumpla los 7 años. Sin embargo, no se suelen detectar hasta que el niño es mucho mayor debido a que son conductas características de la infancia y que, normalmente, se asocian a que el niño es “inquieto”. Por ese motivo, para que se pueda dar un verdadero diagnóstico de TDAH, se han de cumplir los siguientes síntomas incluidos en el libro “Manual de Diagnóstico y Estadístico de los Trastornos Mentales” publicado por la APA (Asociación Americana de Psiquiatría, 2000):

- Presentar todas las conductas propias de TDAH o algunas de ellas en mayor medida que otros niños de su edad y con un nivel de desarrollo similar.
- Aparecer en edades tempranas, normalmente, antes de los 12 años de edad.
- Influir en dos o más ámbitos de la vida del niño, distinguiendo como posibles ámbitos los siguientes: escolar, social y familiar.
- No estar relacionado o ser consecuencia de un problema médico, tóxico ni de origen psiquiátrico.
- Afectar y empeorar la calidad de vida del paciente.

2.8.2. Estadísticas de TDAH

Según (Reinhardt and Reinhardt, 2013), el porcentaje estimado de niños (menores de 18 años) que padecen TDAH es del 5.29%. Además, este trastorno representa entre el 20% y el 40% de las consultas en psiquiatría pediátrica-juvenil. Los estudios de seguimiento a largo plazo (Faraone et al., 2006; Reinhardt and Reinhardt, 2013), han demostrado que entre el 60% y el 80% de los menores de 18 años que han padecido TDAH siguen padeciendo síntomas en su edad adulta. También, destaca que la proporción entre niños y niñas que padecen este trastorno es de 4 a 1, es decir, los niños son tres veces más propensos que las niñas a padecer TDAH (Reinhardt and Reinhardt, 2013).

2.8.3. Clasificación

En base a las características comentadas en el apartado de definición, se establecen tres subtipos de TDAH dependiendo del síntoma dominante en el paciente:

- **Con predominio de déficit de atención.** El paciente es incapaz de centrar su atención en una tarea o actividad concreta.
- **Con predominio de impulsividad-hiperactividad.** El paciente es muy activo y suele actuar sin pensar.

- **Combinado.** En este caso, predominan tanto síntomas de desatención como de impulsividad e hiperactividad, es decir, es un paciente incapaz de concentrar su atención, pero también posee comportamientos impulsivos y demasiado activos.

2.8.4. Principales síntomas de los pacientes con TDAH

Los niños que padecen TDAH suelen presentar los siguientes síntomas agrupados por sus principales características:

- **Síntomas relacionados con la falta de atención.** La falta de atención se suele apreciar sobretodo en el ámbito escolar y en casa. Se caracteriza por:
 - No atienden a las explicaciones y se distraen en los detalles.
 - No siguen instrucciones.
 - No terminan tareas completamente.
 - Dificultad para organizarse.
 - Evitan realizar tareas que le requieran esfuerzo continuado.
 - Olvidan y pierden objetos personales.
 - Olvidan actividades diarias que deben realizar.
- **Síntomas relacionados con la hiperactividad.** La hiperactividad suele ser más evidente en niños más pequeños. Se caracteriza por:
 - Se suelen mover en el asiento o levantarse cuando debe estar sentado.
 - Corren y saltan en situaciones inapropiadas.
 - Dificultad para realizar juegos relajados.
 - Hablan mucho y rápido.
 - Dificultad para guardar su turno.
- **Síntomas relacionados con la impulsividad.** En este apartado se incluye cualquier situación en la que los niños actúan sin pensar en cuáles serán las consecuencias de sus actos. Es un rasgo difícil de apreciar en niños de menor edad.

2.8.5. TDAH y lectura

Debido a los síntomas propios del Trastorno de Déficit de Atención e Hiperactividad, es habitual que los niños que lo padecen presenten un rendimiento académico bajo, así como dificultades en el aprendizaje. Dentro de las distintas áreas de enseñanza destaca la lectura, proceso complejo de realizar en el cual influyen el procesamiento fonológico, la capacidad de atención, concentración, memoria, etc. Muchas de estas funciones se encuentran alteradas en los pacientes con TDAH incluso, algunos estudios revelan que el 40% de los niños con TDAH presentan problemas de lectura (Orjales, 2011). Algunos de los síntomas que presentan los niños con TDAH y que influyen en este aprendizaje son los siguientes (Mena et al., 2006; Orjales, 2011):

- Dificultad para mantener la atención durante tiempos prolongados.
- Dificultades relacionadas con el lenguaje como, por ejemplo, omisiones, sustituciones y/o adicciones de letras, sílabas o palabras durante la lectura.
- Comprensión deficiente del texto que está leyendo.
- Dificultad para seguir la lectura realizada por otra persona o compañero.
- Lectura lenta, silabeada (sílabas a sílabas) o precipitada

Por todo ello, es necesario cambiar los procedimientos de aprendizaje para poder enseñar a leer a niños con déficit de atención. Algunas de las principales recomendaciones de expertos en este trastorno son las siguientes (Mena et al., 2006; Orjales, 2011):

- Leer en voz alta.

- Lecturas de duración breve, por ejemplo, 4 o 5 lecturas de unos 10 minutos como máximo intercaladas con periodos de motivación y juego.
- Recompensa por la lectura. Es muy importante premiarlos por cada párrafo leído, ya sea con un elogio, premio, aspecto positivo, etc.
- Utilizar textos adaptados a su edad y sus capacidades. Una colección de libros adecuados a niños con TDAH se encuentra en el siguiente enlace: <http://www.fundacioncadah.org/web/articulo/tdah-lecturas-recomendadas-afectados-y-familias.html>
- Utilizar textos pequeños con letra grande y a doble espacio. Utilizar colores para los diferentes marcadores, por ejemplo, rojo para las comas, azul para los puntos, etc.
- Realizar juegos y actividades que impliquen leer, por ejemplo, juegos de preguntas y respuestas o juegos de adivinanzas.

2.9. Enfermedades neurodegenerativas

2.9.1. Definición

Las enfermedades neurodegenerativas son aquellas que provocan algún **deterioro de las principales funciones cognitivas del ser humano** (Joint Programme - Neurodegenerative Disease Research, 2014). La causa es la muerte progresiva de neuronas en diferentes regiones del sistema nervioso (Bredesen et al., 2006; Rubinsztein, 2006). No obstante, no se conoce los motivos exactos que provocan esta pérdida neuronal. Algunos estudios lo relacionan con posibles factores genéticos o ambientales, sin embargo, el principal factor de riesgo para el desarrollo de estas enfermedades es la edad. Con una esperanza de vida cada vez mayor, es previsible que la población afectada por este tipo de enfermedades aumente en las próximas décadas.

Los principales síntomas de las enfermedades neurodegenerativas varían en función de la zona del sistema nervioso dañada, por lo tanto, puede afectar a funciones distintas tales como, el habla, la lectura, la memoria, el movimiento, el equilibrio, la respiración, etc. El progreso de este tipo de enfermedades no se puede detener. En la actualidad, no existe cura para estas enfermedades. Sin embargo, si se puede ralentizar el deterioro cognitivo y funcional e intentar paliar los síntomas o aumentar la actividad de las neuronas existentes.

2.9.2. Principales enfermedades

Las enfermedades más conocidas pertenecientes a este grupo son las siguientes (Garcés, 2016):

Enfermedad del Alzheimer

Es la enfermedad neurodegenerativa más frecuente y la forma más común de demencia entre las personas mayores. Esta enfermedad comienza afectando al pensamiento, a la memoria y al lenguaje. Con el tiempo, estos síntomas empeoran llegando a no reconocer a sus propios familiares, tener dificultades para hablar, leer o escribir e incluso, olvidar como realizar tareas sencillas y cotidianas como lavarse los dientes o saber volver a su casa (Waldemar et al., 2007). Por todos estos motivos, los enfermos de Alzheimer terminan necesitando cuidados totales. Su esperanza de vida depende de la edad en la que se produzca el comienzo de la enfermedad ya que gradualmente se pierde las funciones biológicas que finalmente, llevan a la muerte (Tabert et al., 2006; Waldemar et al., 2007). Normalmente, un enfermo de Alzheimer tiene una esperanza de vida media de 7 años (Mölsa et al., 1986).

Enfermedad del Parkinson

Esta enfermedad afecta a la región del sistema nervioso encargada de coordinar la actividad, el tono muscular y los movimientos. Algunos de sus síntomas son: el temblor de las extremidades, cara y mandíbula, rigidez, movimientos lentos y problemas de equilibrio y coordinación. Inicialmente, estos síntomas sólo afectan a un lado del cuerpo y después, a ambos lados. Cuando el paciente empeora pueden aparecer otros problemas como depresión, dificultades para dormir, comer, hablar e incluso tragar. Al igual que el resto de enfermedades neurodegenerativas no tiene cura pero si existen medicamentos que mejoran sus síntomas permitiendo llevar una vida más o menos normal durante varios años (National Institute of Neurological disorders and stroke, 2015).

Esclerosis Múltiple (EM)

Es una de las enfermedades neurodegenerativas más comunes en la población de 20 a 45 años. Sus principales síntomas son la fatiga, dolores, falta de equilibrio, deterioro visual, problemas

de habla, escritura, temblores, etc. Actualmente, no se conoce su causa ni su cura, aunque sí se sabe que afecta mucho más a las mujeres que a los hombres (el doble aproximadamente) (Chacon, 2016)

Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA)

Es una enfermedad degenerativa que ataca a las neuronas motoras. Estas neuronas son las encargadas de transmitir los mensajes desde el cerebro y la médula espinal hacia los músculos voluntarios. Inicialmente, afecta a los músculos de las extremidades hasta la parálisis y después, afecta al habla, respiración, ingestión, etc. Al igual que en la Esclerosis Múltiple, no se conoce la causa de esta enfermedad, sin embargo, la Esclerosis Lateral Amiotrófica es más común entre los hombres que entre las mujeres. Es una enfermedad incurable pero algunos tratamientos pueden aliviar sus principales síntomas. La esperanza de vida media de los enfermos de ELA es de 3 a 5 años (Tuñón, 2016).

2.9.3. Estadísticas de las enfermedades neurodegenerativas

Algunas estadísticas sobre las principales enfermedades neurodegenerativas comentadas en el apartado anterior son las siguientes:

- El Alzheimer afecta a unos 15 millones de personas en todo el mundo, 717.000 en España. Suele aparecer en personas de más de 65 años (Waldemar et al., 2007). A partir de los 85 años, lo padece casi el 50% de la población y según las previsiones, en 2050 habrá más de 100 millones de afectados (Garcés, 2016).
- La enfermedad del Parkinson suele comenzar sobre los 60 años y es la segunda enfermedad neurodegenerativa más frecuente en nuestro país tras el Alzheimer. Afecta a más de 6.3 millones de personas en todo el mundo (Garcés, 2016).
- Según datos de la Sociedad Española de Neurología, en España, hay 47000 casos de Esclerosis múltiples de los cuáles el 70% son mujeres.
- La Esclerosis Múltiple Amiotrófica afecta aproximadamente a 3 personas de cada 100000 habitantes al año (Tuñón, 2016). En España, según la Sociedad Española de Neurología, hay más de 3000 personas afectadas.

2.9.4. Enfermedades neurodegenerativas y lectura

Como se han comentado en los apartados anteriores, todas las enfermedades neurodegenerativas afectan en mayor o menor medida en la lectura, escritura, habla, etc. No se encontrado ningún estudio que determine un patrón de lectura común para diagnosticar todas estas enfermedades. De igual manera, no se han encontrado recomendaciones que pueda ayudar en la lectura a las personas que padecen este tipo de enfermedades, sin contar aquellas recomendaciones obvias para una persona que tiene dificultades para leer. Sin embargo, si existen algunos estudios que utilizan los sistemas de seguimiento ocular para hacer un posible diagnóstico precoz de algunas de ellas. Por ejemplo, en el caso del Alzheimer, (Fernández et al., 2013) demostraron que el seguimiento ocular puede ser una técnica importante para detección precoz de esta enfermedad. En (University Lancaster and Lytham Hospital, 2012) se realizó un estudio en el que participaron pacientes con Alzheimer así como personas sanas. El objetivo para todos ellos era seguir el movimiento de la luz por la pantalla del ordenador y en ocasiones, se les indicaba que mirasen en la dirección contraria en la que se encontraba la luz. Como resultado del estudio, se comprobó que los pacientes con Alzheimer se equivocaban cuando debían de mirar en dirección contraria a la luz. No obstante, no se ha encontrado ningún artículo

en el que se haya demostrado que la lectura de un texto con unas características concretas pueda servir para diagnosticar estas enfermedades, aunque almacenar los patrones de lectura de pacientes que padecen enfermedades neurodegenerativas resultaría muy útil para que los profesionales correspondientes pudieran obtener conclusiones interesantes al comparar estos patrones de lectura con los patrones de lectura de personas sanas.

3. Diseño de la aplicación

En este apartado se comentan los principales detalles del diseño de la aplicación resultante de este trabajo. Se recuerda que el objetivo principal era el desarrollo de una aplicación interactiva que permitiera el registro de patrones de lectura del usuario con un dispositivo de seguimiento ocular de bajo coste y el análisis del uso de esta aplicación para la recomendación de diagnóstico de distintas patologías.

3.1. Dispositivo

Actualmente, existen varios dispositivos que proporcionan la información necesaria para realizar el registro de los patrones de lectura del usuario. Como ya se ha comentado en el apartado anterior, hay varias empresas especializadas en el diseño de dispositivos de seguimiento de mirada. Sin embargo, uno de los principales aspectos a considerar en este trabajo es que el seguimiento de la mirada se realice con un dispositivo de bajo coste que, aunque no proporcione tanta precisión como los dispositivos de coste superior, permita conseguir la precisión suficiente para poder realizar un registro de patrones de lectura de calidad, que posteriormente pueda ser utilizado para la recomendación de diagnóstico de distintas patologías. Además, el uso de un dispositivo de bajo coste permite que la aplicación desarrollada en este trabajo pueda ser utilizada en campos muy diversos. Por todos estos motivos, se ha optado por elegir un dispositivo de bajo coste, en concreto, el dispositivo de The Eye Tribe Tracker perteneciente a la empresa The Eye Tribe, comentado en el apartado 2.6. En esta sección, se comentarán sus principales características de manera más detallada, así como la información y datos que proporciona del seguimiento de la mirada de los usuarios.

3.1.1. Características generales

The Eye Tribe Tracker (<http://dev.theeyetribe.com/general/>) es un rastreador ocular que obtiene el punto de mirada del usuario en la pantalla del ordenador a partir de la información que extrae de sus ojos y su cara. Las coordenadas de la mirada se representan por el par (x, y) y se calculan en función de la pantalla a la que el usuario está mirando. Para ello, es necesario que el rastreador ocular se sitúe debajo de la pantalla del ordenador y apunte al usuario. Además, el usuario debe situarse dentro del “trackbox” del rastreador, volumen en el espacio dentro del cual, el rastreador puede registrar la mirada del usuario. En el anexo 1, se incluye una guía del dispositivo donde se explica entre otros aspectos, cómo realizar la instalación del dispositivo y la posición en la que debe situarse el usuario.

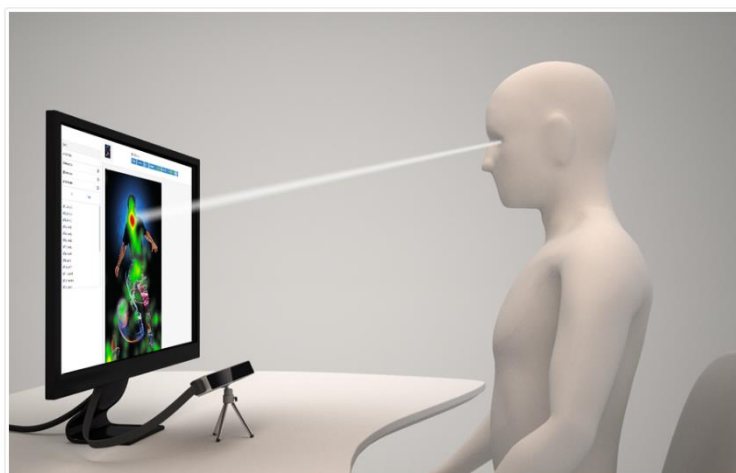


Ilustración 11: Posición del usuario y del dispositivo: <http://dev.theeyetribe.com/general/>

Una vez situado el dispositivo en la posición correcta y al usuario dentro de la zona de registro, es necesario realizar la calibración del rastreador ocular. La calibración es un procedimiento personalizado para cada usuario con el que se realiza la asignación entre las coordenadas de la pantalla del ordenador y la posición de la mirada del usuario. Por este motivo, se trata de un procedimiento totalmente necesario para el rastreador ya que, con él, el software del dispositivo realiza la asignación para determinar la mirada del usuario con precisión. El procedimiento de calibración es definido por el propio rastreador. No obstante, se pueden definir algunas de sus características mediante la interfaz de usuario del dispositivo. La calibración suele durar unos 20 segundos, durante los cuales, el usuario debe fijar la vista sobre un punto blanco mostrado en diferentes posiciones de la pantalla del ordenador.

Terminado este procedimiento, el sistema puntuará la calidad de la calibración en una escala y dará un mensaje de valoración. Para una buena precisión en el seguimiento de la mirada es necesario que la calidad de la calibración obtenga una puntuación de 4 o 5 estrellas. En caso contrario, será necesario repetir este procedimiento. Todos los detalles de la calibración del dispositivo y los principales aspectos que se pueden configurar se explican con mayor detalle en el anexo 1.

A partir de este momento, el software del dispositivo de seguimiento de mirada calculará las coordenadas de la mirada del usuario con una precisión aproximada de 0.5 a 1º del ángulo visual. Así, si el usuario se sitúa a unos 60 cm del dispositivo, esta precisión corresponde a un error medio sobre la pantalla de 0.5 a 1 cm.

3.1.2. Datos que proporciona

The Eye Tribe Tracker obtiene distinta información de la mirada del usuario que muestra en formato JSON a través de la interfaz del usuario como se puede ver en la imagen inferior (para más detalles, véase anexo 1).

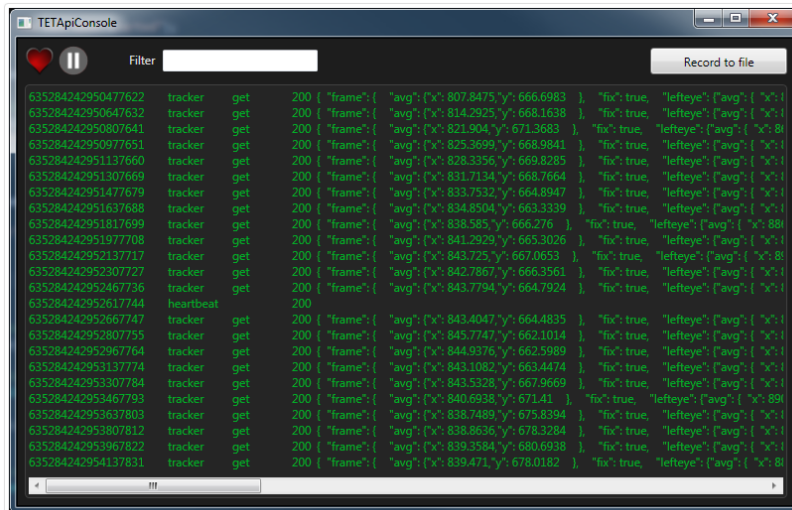


Ilustración 12: Información del dispositivo. Formato JSON: <http://dev.theeyetribes.com/general/>

La información de la mirada que proporciona el dispositivo es la que se especifica a continuación. Es importante aclarar que siempre que se refiere a una coordenada, se trata del conjunto de dos valores enteros, x e y, salvo en el caso de las coordenadas del centro de la pupila que son valores flotantes.

- **Timestamp:** String que contiene el tiempo en formato
- **Time:** Tiempo en ms.
- **Fix:** Valor bool que determina si la mirada está fija o no.
- **State:** Entero de 32 bits que determina el estado.
- **Coordenadas raw:** Coordenadas raw de la mirada en píxeles.
- **Coordenadas smoothed:** Coordenadas smoothed de mirada en píxeles.
- **Información del ojo izquierdo:** Coordenadas raw en píxeles, coordenadas smoothed en píxeles, tamaño de la pupila y coordenadas normalizadas del centro de la pupila.
- **Información del ojo derecho:** Coordenadas raw en píxeles, coordenadas smoothed en píxeles, tamaño de la pupila y coordenadas normalizadas del centro de la pupila.

Para el desarrollo de la aplicación es necesario trabajar con estos campos y para ello, se usa la SDK del dispositivo utilizando el lenguaje de programación C++ para trabajar con las funciones que proporciona. No obstante, se hablará con más detalle del uso de la información proporcionada por el dispositivo en el siguiente apartado de esta memoria.

3.2. Usuario final de la aplicación

El usuario final para el que se ha desarrollado la aplicación es un usuario adulto con un nivel de lectura adecuado y con un mínimo conocimiento del procedimiento que está realizando. En este sentido, la aplicación permitirá al usuario conocer los pasos que debe seguir para registrar su patrón de lectura y el porqué de algunos de esos pasos. También, este usuario podrá ver los resultados de la aplicación, pero solamente por la curiosidad de conocer el patrón de lectura que ha obtenido.

Por otro lado, el plan futuro para esta aplicación es orientarla al ámbito médico para que, con los cambios necesarios, pueda servir como aplicación para la recomendación de diagnóstico de algunos de los trastornos y enfermedades comentadas en el apartado 2. En el caso de la dislexia, sería necesario volver a rediseñar algunos aspectos de la interfaz de la aplicación ya que, los

usuarios finales de la aplicación serían niños, debido a que el diagnóstico de la dislexia se realiza en edades tempranas. Por lo tanto, sería conveniente hacer la interfaz más amena para la edad de estos usuarios.

El uso de la aplicación para la recomendación de patologías también haría que apareciera un nuevo perfil externo en contacto con la aplicación, seguramente, médico, enfermero o técnico que sería el encargado de analizar y valorar los patrones de lectura obtenidos. La existencia de este nuevo perfil futuro, así como la posible finalidad médica, ha llevado a la incorporación de diferentes aspectos para que sea lo más adecuada posible para tal objetivo. Entre ellos, destaca el diseño de la interfaz con una identificación previa del usuario, procedimientos de cifrado de la información personal del usuario, creación de un número identificador del usuario, desarrollo de resultados en diferentes carpetas asociadas al identificador del usuario, etc. Estos y otros aspectos del diseño se comentarán con mayor detalle en los siguientes apartados.

3.3. Aplicación final

El producto resultante de este trabajo ha sido una aplicación con la que se permite registrar los patrones de lectura de los usuarios. De manera general, el diseño de la aplicación resultante sigue el siguiente esquema:

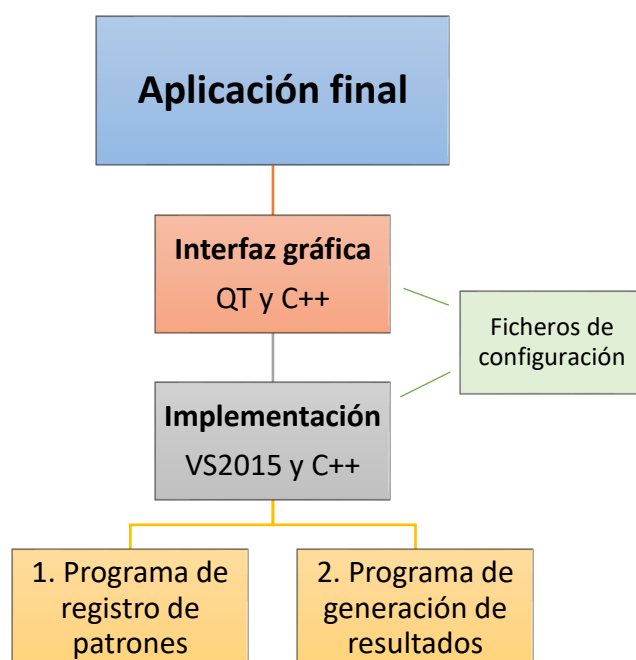


Ilustración 13: Esquema de la aplicación final.

La aplicación consta de una interfaz desarrollada con QT Creator (<https://www.qt.io/ide/>). Con este IDE basado C++ se ha realizado la interfaz de usuario y parte de la funcionalidad de la aplicación. Bajo esta interfaz, se encuentran los programas principales de la aplicación encargados de realizar el registro del patrón de lectura del usuario y la generación de los resultados en diferentes formatos. Para ello, se ha utilizado Visual Studio 2015 (<https://www.visualstudio.com/es/>) con el lenguaje de programación C++.

La interfaz de usuario y los programas encargados de la funcionalidad básica de la aplicación se comunican mediante ficheros de configuración. El contenido de estos ficheros será comentado en el siguiente apartado 3.4. Ficheros de configuración. Estos ficheros, así como los ficheros de

lectura (apartado 3.5) y los ficheros resultantes (apartado 3.6) se incluyen en una serie de directorios asociados a la aplicación final resultante. La denominación de estos directorios es “Setting”, directorio que contiene los ficheros de configuración, “Reading files”, contiene los ficheros de lectura y “Results”, incluye los ficheros resultantes generados por la aplicación. La ruta de este último directorio es por defecto, es decir, el usuario puede modificar su ubicación mediante la interfaz de usuario.

3.3.1. Diseño de la interfaz

La idea principal de la interfaz de la aplicación es que fuera lo más sencilla y funcional posible, es decir, que con pocos cambios de ventanas el usuario fuera capaz de configurar y trabajar con el rastreador ocular y que una vez configurado, se pudiera hacer uso de algún texto para así registrar el patrón de lectura del usuario. No obstante, conforme se iba avanzando en el desarrollo del trabajo se han ido incorporando aspectos de gran utilidad que le han añadido valor a la interfaz mejorando así su calidad y presencia. Todos los detalles de la interfaz final de la aplicación, así como imágenes de la interfaz resultante, se comentarán en el apartado 4.1. Interfaz de la aplicación.

3.3.2. Diseño del código

El código desarrollado se ha dividido en dos programas. El primer programa, al que denominaremos a partir de ahora “*programa de registro de patrones*”, se encarga principalmente de recoger, tratar, manejar y almacenar los datos obtenidos por el dispositivo de seguimiento ocular. El segundo programa, “*programa de generación de resultados*”, trabaja con los datos del programa anterior mostrándolos en diferentes formatos. Aunque ambos programas son independientes, para poder ejecutar el programa de generación de resultados y obtener los resultados esperados, es necesario haber ejecutado anteriormente el programa de registro de patrones. Los detalles de la implementación final se comentarán en el apartado 4.2. Implementación de la aplicación.

3.4. Ficheros de configuración

Para trabajar y compartir información entre los programas principales de la aplicación y la interfaz ha sido necesario un procedimiento de comunicación entre ambos. Para ello, se ha utilizado un conjunto de ficheros de configuración en los que se almacena la información y decisiones que el usuario va proporcionando a través de la interfaz de la aplicación y que posteriormente serán utilizadas en los programas desarrollados. Además de este fichero, se ha generado dos ficheros más con información del usuario. En resumen, los ficheros creados por la aplicación han sido los siguientes:

- “*Setting_file.txt*,” incluye la ruta del fichero de lectura, el tiempo de lectura y la ruta del directorio donde el usuario desea guardar los resultados.
- “*Doctor.txt*”, destinado al perfil externo de la aplicación, posiblemente doctor, aparece la fecha y hora del registro, nombre, apellidos y edad del usuario y número de prueba realizada. Además, como último valor, se incluye el identificador de usuario obtenido a partir del cálculo hash (Menezes et al., 1997) de los datos personales del usuario. De esta manera, este identificador solo puede pertenecer a un usuario y el perfil externo es el único que conoce la asignación entre usuario e identificador.
- “*Users.txt*”, incluye solamente el número identificador de los usuarios que han utilizado la aplicación.

Todos estos ficheros se encuentran en la carpeta “*Setting*” situada en el directorio principal de aplicación desarrollada.

3.5. Ficheros de lectura

En el directorio principal de la aplicación, se incluye otra carpeta denominada “*Reading files*”. En ella, se incluyen algunos ejemplos de ficheros de lectura que el usuario puede utilizar para la aplicación. No obstante, se permite utilizar otros ficheros de lectura siempre que cumplan con los requisitos necesarios para la aplicación. Estos requisitos son los siguientes:

- *Formato*. Imágenes en formato *png* con texto.
- *Tamaño de la imagen*. Depende del dispositivo en el que se ejecute la aplicación. Para el ordenador utilizado en el desarrollo de este trabajo, el tamaño es de 1920 x 1080.
- *Características de texto*. Tipología de letra clara y fácil de leer, con tamaño de letra 14 o superior e interlineado 1.5. o superior.

Por último, comentar que los ficheros de lectura incluidos en la carpeta “*Reading files*” en el momento de la entrega de este trabajo corresponden a los ficheros utilizados para la evaluación de la aplicación que se explicarán con mayor precisión en el apartado 5.1. Textos para la lectura.

3.6. Resultados

Junto a los directorios “*Setting*” y “*Reading files*”, se encuentra la carpeta “*Results*” que contiene todos los resultados de la aplicación. Dentro de esta carpeta, serán almacenados los resultados de cada usuario en carpetas independientes denominadas con el número identificador del usuario. De esta manera, cada usuario tendrá su carpeta de resultados. La aplicación desarrollada proporciona los siguientes resultados:

- “*Right_full.png*” y “*Left_full.png*”. Muestran el patrón de lectura de ojo derecho e izquierdo del usuario generados a partir de todos los valores almacenados durante el registro de la lectura realizada por el usuario.
- “*Right.png*” y “*Left.png*”. Muestran el patrón de lectura de ojo derecho e izquierdo del usuario generados a partir de los valores almacenados durante el registro de la lectura realizada por el usuario y tras realizar un filtro que elimina los valores nulos. Un valor nulo es aquel registro del patrón de lectura que tiene valores de cero en sus coordenadas. Estos valores son registrados por el propio dispositivo y sin relación con la lectura del texto realizada por el usuario. Por ese motivo, esta versión “reducida” y con información más relevante del registro será utilizada en éstos y los siguientes resultados comentados.
- “*Right_color.png*” y “*Left_color.png*”. Presentan el patrón de lectura del ojo derecho e izquierdo con su evolución en el tiempo. Para determinar la evolución en el tiempo se utiliza una escala de colores de manera que, el color va cambiando conforme el patrón de lectura registrado va avanzando en el tiempo.
- “*Right_pupil.png*” y “*Left_pupil.png*”. Muestran el tamaño de la pupila del ojo derecho e izquierdo durante la lectura.
- “*Right_movie.mpeg*” y “*Left_movie.mpeg*”. Se muestra el avance del patrón de lectura del ojo derecho e izquierdo dinámicamente.

4. Desarrollo de la aplicación

En esta sección se detallan los principales aspectos de la aplicación resultante de este trabajo. El primer apartado se centra en comentar los aspectos relativos a la interfaz gráfica de la aplicación detallando el contenido de las distintas interfaces. Y, en el segundo apartado, se explican los procedimientos y detalles más relevantes de la implementación realizada.

4.1. Interfaz de la aplicación

4.1.1. QT creator y C++

La interfaz de la aplicación desarrollada se ha realizado utilizando QT Creator (<https://www.qt.io/ide/>). Este IDE permite crear aplicaciones con interfaces gráficas completas y totalmente configurables al gusto del desarrollador. Además, da la posibilidad de desarrollar las interfaces tanto de modo visual como mediante código C++ facilitando la configuración de las características de la interfaz como colores de fondo, tipología de letras, incorporación de imágenes, interacción entre diferentes interfaces, etc. Por otro lado, la curva de aprendizaje de este IDE no es demasiado elevada. Por todos estos motivos, se ha elegido este programa para realizar la aplicación de este trabajo.



Ilustración 14: Icono QT Creator: <https://www.qt.io/ide/>

4.1.2. Interfaz final

En este apartado, se van explicar todos los aspectos relacionados con la interfaz de la aplicación final. Para que esta explicación sea lo más clara y sencilla posible se va a dividir en las distintas pantallas que incluye la aplicación. Así, se mostrará cada una de ellas y se comentará su contenido y detalles más relevantes.

Inicio

En la imagen inferior se muestra la ventana inicial. En ella, se ve un mensaje de explicación y un conjunto de botones que indicarán los pasos a seguir para realizar el registro del patrón de lectura. Al pulsar cada uno de estos botones aparecerá una nueva ventana emergente con la que el usuario deberá interactuar para continuar con el siguiente paso del procedimiento.

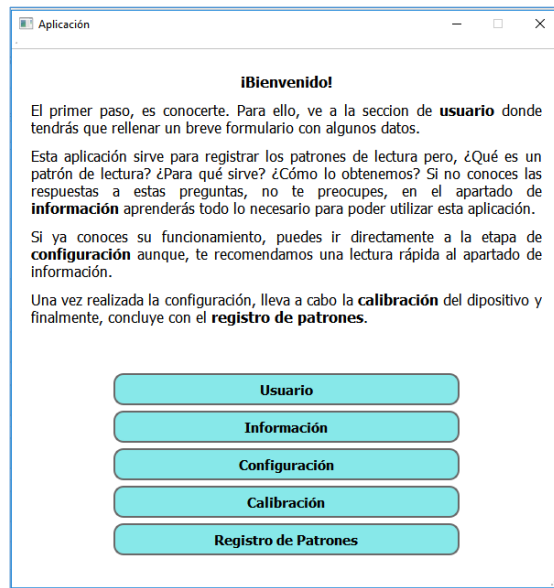


Ilustración 15: Interfaz de Inicio.

Las diferentes etapas del procedimiento son consecutivas, por ese motivo, la aplicación dispone de mensajes de aviso para el usuario, que le orientan a realizar las diferentes fases en el orden correcto. A continuación, se muestra un ejemplo de este tipo de mensaje.

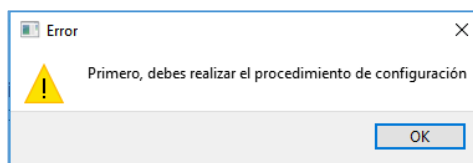


Ilustración 16: Interfaz de Error.

Usuario

Al hacer click en *Usuario* aparece la interfaz inferior. En ella, el usuario introduce su información personal y el número de la prueba que está realizando. De esta manera, se pueden distinguir los distintos intentos o pruebas realizadas por un mismo usuario.

Ilustración 17: Interfaz de Usuario.

Esta información, junto con el día y hora del registro se almacenan en el fichero “Doctors.txt” al pulsar en *Ok*. Además, se crea un número identificativo seleccionando los 8 primeros dígitos del número hash calculado de estos valores mediante el algoritmo criptográfico MD5 (<https://www.ietf.org/rfc/rfc1321.txt>) proporcionado por QT. El código correspondiente al almacenamiento de los valores del usuario y creación del número identificativo se muestra en la ilustración 18.

```

// Create and open setting file
QString usersFile_name = "D:/TFM_Aplicacion/Application_Qt/Application/Settings/Users.txt";
QFile usersFile(usersFile_name);
usersFile.open(QFile::Append | QFile::WriteOnly | QFile::Text);
QTextStream outU(&usersFile);

// Save date and hour
QDate date = QDate::currentDate();
QString sdate = date.toString("dd/MM/yy");
QTime time = QTime::currentTime();
QString stime = time.toString();

// Save name, surnames and age
QString name = ui->lineEdit_name->text();
QString surn = ui->lineEdit_surnames->text();
QString age = ui->lineEdit_age->text();
QString numTest = ui->lineEdit_numTest->text();

// Calculate hash of date, hour, name, surname age and numRepeat
QCryptographicHash * hash;
QByteArray user = hash->hash((sdate + stime + name + surn + age + numTest).toUtf8(), QCryptographicHash::Md5);

// Create id and save
QString user_hash = user.toHex();
QString id = user_hash.mid(0,8);
outU << id << endl;

// File to doctor
QString doctorFile_name = "D:/TFM_Aplicacion/Application_Qt/Application/Settings/Doctor.txt";
QFile doctorFile(doctorFile_name);
doctorFile.open(QFile::Append | QFile::WriteOnly | QFile::Text);
QTextStream outD(&doctorFile);
outD << sdate << "\t" << stime << "\t" << name << "\t" << surn << "\t" << age << "\t" << numTest << "\t" << user_hash << endl;

```

Ilustración 18: Código de la ventana de Usuario.

Información

Al pulsar en el botón *Información* aparece una ventana con preguntas y respuestas. En ella, se explica al usuario el conocimiento necesario para realizar el procedimiento de registro de patrones. También, se comentan algunos conceptos para conocer el porqué de este procedimiento, por ejemplo, las preguntas mostradas en la ilustración 19.

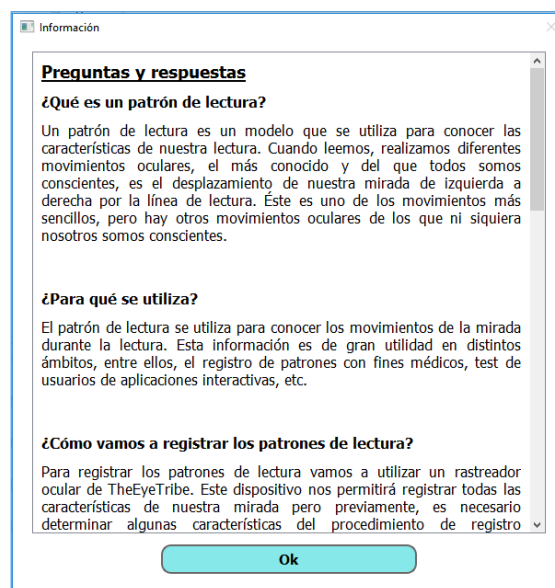


Ilustración 19: Interfaz de Información.

Configuración

En esta ventana el usuario determina el documento de lectura, el tiempo durante el que se registra el patrón de lectura (duración de la lectura) y la ruta de la carpeta donde desea que se guarden los resultados.

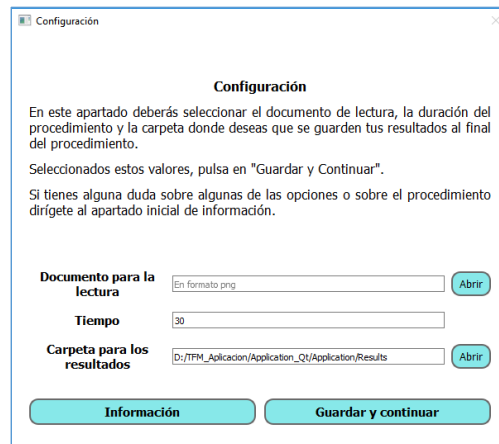


Ilustración 20: Interfaz de configuración.

Como se ve en la ilustración 20, para el documento de lectura, se recuerda que debe ser una imagen en formato *png*. El tiempo se define en segundos y por defecto, será de 30 segundos. Y la ruta de la carpeta de resultados, por defecto, será el directorio principal de la aplicación, aunque el usuario puede seleccionar cualquier otra. Toda esta información se almacena en el fichero “*Setting_file.txt*” ya comentado.

Calibración

Al pulsar en el botón *Calibración*, aparece la interfaz del procedimiento de calibración del dispositivo. Como ya se ha comentado en el apartado 3, el usuario debe realizar este procedimiento para que los datos proporcionados por el rastreador sean los correctos. Una vez realizado el procedimiento no se puede cerrar las interfaces abiertas por el dispositivo (servidor e interfaz de usuario), es necesario minimizarlas y continuar con la interfaz de la aplicación. En la ilustración inferior, se muestra la interfaz del procedimiento de calibración del dispositivo. Si desea conocer más información sobre la calibración diríjase al anexo 1 de esta memoria.

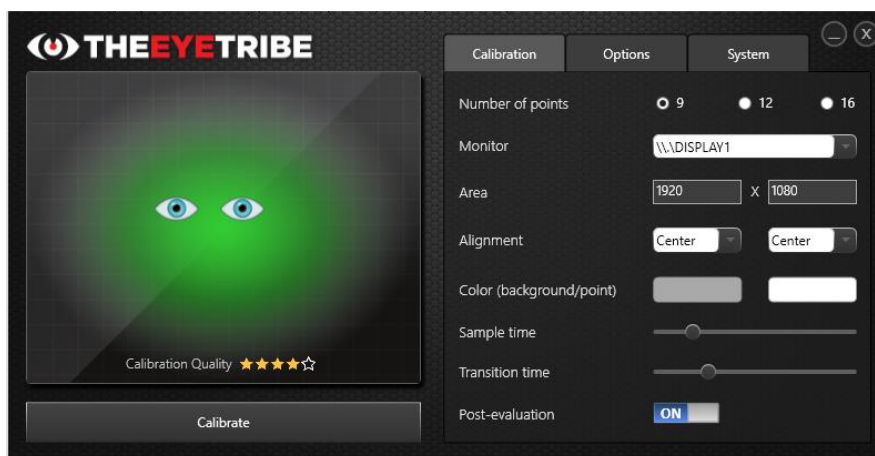


Ilustración 21: Interfaz del procedimiento de Calibración del dispositivo.

Registro de patrones

Finalmente, se pulsa en *Registro de patrones*. Este evento lanzará una nueva ventana en la que se avisa al usuario de que no debe comenzar la lectura antes de escuchar una señal acústica.

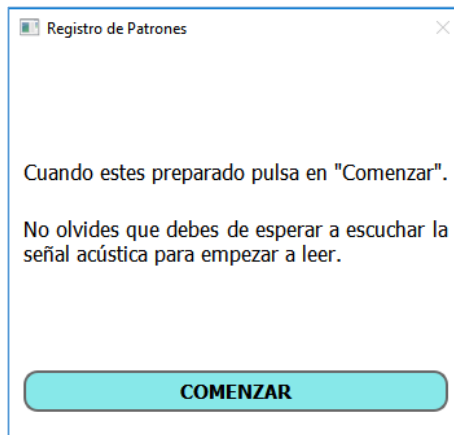


Ilustración 22: Interfaz de Registro de Patrones.

Lectura

Tras pulsar *Comenzar* (ventana anterior) aparecerá la interfaz mostrada en la ilustración 23. En ella, se muestra el texto de lectura elegido por el usuario durante la configuración en ventana completa. Este cambio de ventana es necesario ya que, el procedimiento de calibración se ha realizado teniendo en cuenta la pantalla del ordenador al completo. Aproximadamente 2 segundos después se escuchará un pitido y el usuario deberá comenzar a leer. A partir de este momento, la lectura del texto durará los segundos indicados por el usuario.

Silicon Valley intenta hacer las paces con el presidente electo de Estados Unidos. En la campaña, Donald Trump convirtió a la industria tecnológica en la diana de sus dardos verbales. En Silicon Valley, motor de la innovación global, el republicano era persona non grata. El presidente electo recibió a los jefes de Facebook, Google y Amazon, entre otros, en la Torre Trump de Manhattan, un primer contacto con un sector clave en la economía estadounidense. Para Trump, obligar a desplazarse a los capitanes de Silicon Valley, los que le criticaron, y que en su mayoría votaron y financiaron a la demócrata Hillary Clinton, a su residencia en Nueva York es una exhibición del poder que ostenta tras las elecciones del 8 de noviembre.

Ilustración 23: Interfaz de Lectura.

Final

Trascurrido el tiempo de lectura, aparece la interfaz final (ilustración 24). En ella, se avisa al usuario de que el procedimiento ha terminado y le muestra su número identificador para que pueda ir a la carpeta de resultados y ver el patrón de lectura almacenado. En un posible uso médico de esta aplicación, este valor no se mostraría al usuario. Sin embargo, en esta versión si se añade para que el uso de la aplicación sea completo y tenga sentido.

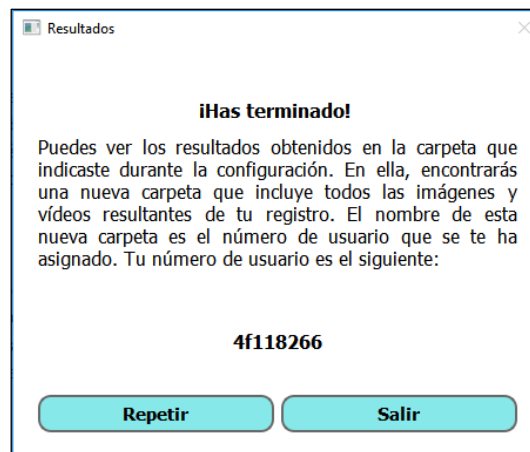


Ilustración 24: Interfaz de Final.

4.2. Implementación de la aplicación

4.2.1. C++ y Visual Studio

El dispositivo de The Eye Tribe Tracker dispone de distintas SDK en los principales lenguajes de programación, entre ellos, Java, C++ y Python. En este trabajo se ha decidido utilizar el lenguaje de programación C++. Además, se ha optado por trabajar sobre Visual Studio C++ 2015 para facilitar la implementación y el uso de la SDK junto con otras librerías necesarias para el desarrollo del sistema. La configuración inicial de este IDE no fue fácil, sin embargo, una vez realizada y conocido el procedimiento para crear los proyectos con los requisitos necesarios, ha resultado óptima para la implementación de la aplicación de seguimiento ocular.

Para cada programa desarrollado, la configuración de Visual Studio ha sido distinta debido al uso de distintas librerías en ambos programas. Para el programa de registro de patrones se ha incluido el SDK del dispositivo y la librería Boost, imprescindible para el SDK. El procedimiento de configuración de Visual Studio 2015 en este caso ha sido el siguiente:

1. Descargar Visual Studio 2015 <https://www.visualstudio.com/es/downloads/> , SDK del dispositivo para C++ y Librería Boost para Windows – Visual Studio (<http://www.boost.org/>).
2. Instalar Visual Studio 2015, SDK del dispositivo y librería Boost.
3. Crear un proyecto que permita trabajar con los datos proporcionados por el dispositivo. Para ello, es necesario seguir los siguientes pasos:
 - 3.1. Crear el proyecto siguiendo el menú de Visual Studio 2015.
 - 3.2. Incorporar al proyecto los ficheros cabecera (ficheros .h) y los ficheros de implementación (ficheros .cpp) de la carpeta de la SDK del dispositivo.
 - 3.3. En propiedades del proyecto → C/C++ → General → directorio de inclusiones adicionales, añadir la ruta del directorio donde se encuentra los ficheros de la SDK del dispositivo y la ruta de directorio principal de la librería Boost instalada.
 - 3.4. En propiedades del proyecto → C/C++ → Encabezados precompilado asignar “No utilizar encabezados precompilados”
 - 3.5. En propiedades del proyecto → Vinculador → General → Directorio de inclusiones adicionales, añadir la ruta del directorio principal de la librería Boost.

Por otro lado, para el programa de generación de resultados del seguimiento ocular ha sido necesario el uso de GNUPLOT. Para ello, se ha descargado la librería gnuplot (<http://www.gnuplot.info/>) y se ha incluido el fichero “*gnuplot.h*” como fichero cabecera en el programa.

4.2.2. Programa de registro de patrones

Este programa permite almacenar la información proporcionada por el dispositivo sobre la mirada del usuario durante la duración del registro. En gran medida, se podría considerar el programa principal de la aplicación ya que, sin él, la generación de resultados y la aplicación final no tendrían ningún sentido. En este apartado, se van a comentar los principales aspectos de la implementación. No obstante, en el anexo 2 se incluirá el código del fichero principal en su totalidad para que pueda ser analizado con mayor nivel de detalle.

Para hacer uso de los datos que el dispositivo registra durante la lectura del usuario es necesario utilizar la SDK propia del rastreador utilizado. Tras analizar en detalle todos los ficheros pertenecientes a esta SDK y con ayuda del único foro del dispositivo de The Eye Tribe Tracker, se ha realizado la implementación de la clase *MyGaze* que permite obtener de manera sencilla la información que el dispositivo es capaz de proporcionar sobre la mirada del usuario. Por tanto,

el *main* de este programa comienza con la creación de un objeto de esta clase como se ve en la siguiente ilustración. Esta imagen corresponde a la parte inicial del *main* del programa de registro de patrones. En los siguientes párrafos, se comentan los distintos procedimientos incluidos en esta parte inicial.

```
// Creating MyGaze class object
MyGaze on_gaze;

// Get the file reading, time and results folder from setting file
string reading_file;
string results_folder;
double time = 0.0;
getTimeFolder(reading_file, time, results_folder);

// Get the user id
string user_id;
getUserId(user_id);

// Change format of the results folder
changeFormat(results_folder);

// Create a folder for user
string user_folder = results_folder + "\\" + user_id;
namespace fs = std::experimental::filesystem;
// Check if folder_user exists
if (!fs::exists(user_folder)) {
    fs::create_directory(user_folder);
}
```

Ilustración 25: Código parte inicial del main del programa de registro de patrones.

Tras la creación del objeto de la clase *MyGaze*, se lee el fichero de configuración "*Setting_file.txt*" para obtener la ruta del fichero de lectura, el tiempo de lectura y la ruta del directorio de resultados donde el usuario desea almacenar los resultados. Para este procedimiento, se ha implementado la siguiente función auxiliar.

```
/*
Function to get the file reading, time and results folder from setting file
*/
void getTimeFolder(string &reading_file, double &time, string &results_folder) {
    ifstream setting_file;
    string time_str;

    // Open setting file and read its contents
    setting_file.open("D:\\TFM_Aplicacion\\Application_Qt\\Application\\Settings\\setting_file.txt");
    if (setting_file.is_open()) {
        getline(setting_file, reading_file);
        getline(setting_file, time_str);
        getline(setting_file, results_folder);
        setting_file.close();
    }
    else {
        cout << "Fichero inexistente o faltan permisos" << endl;
    }

    time = atof(time_str.c_str());
}
```

Ilustración 26: Código función getTimeFolder.

El siguiente paso es obtener el identificador de usuario para lo cual, es necesario leer el fichero "*Users.txt*". Este procedimiento de lectura se muestra en la ilustración 27.

```

/*
Function to get the user id
*/
void getUserId(string &user_id) {
    ifstream users_file;
    string line;

    // Open setting file and read its contents
    users_file.open("D:\\TFM_Aplicacion\\Application_Qt\\Application\\Settings\\Users.txt");
    if (users_file.is_open()) {
        while (getline(users_file, line)) {
            user_id = line;
        }
        users_file.close();
    }
    else {
        cout << "Fichero inexistente o faltan permisos" << endl;
    }
}

```

Ilustración 27: Código función getUserId.

Almacenados los valores definidos por el usuario desde la aplicación, es necesario cambiar el formato de la ruta de la carpeta de resultados. Este cambio se debe al uso de Visual Studio y el sistema operativo Windows cuyas rutas de acceso a los ficheros son diferentes a las almacenadas en los ficheros por Qt. Así, el cambio a realizar consiste en modificar el sentido del separador de ruta “/” por “\\”. Para realizar este cambio de formato se ha implementado la función *changeFormat* mostrada a continuación. El último procedimiento realizado en la primera parte del código es la creación de la carpeta de resultados del usuario en el directorio deseado.

```

/*
Function to change the format
*/
void changeFormat(string &reading_file) {

    int i = 0;
    for (;;) {
        i = reading_file.find("/", i);
        if (i == string::npos) {
            break;
        }
        reading_file.replace(i, 1, "\\");
    }
}

```

Ilustración 28: Código función changeFormat.

A continuación, se comenta la parte final del programa que se muestra en la imagen inferior (ilustración 29). Esta parte comienza con la creación de dos ficheros, “*full_reading_pattern.txt*” y “*reduced_reading_pattern.txt*”. En el primero, se va a almacenar toda la información que proporciona el rastreador durante el tiempo de lectura del usuario y, en el segundo, se almacenara esta misma información, pero eliminando valores nulos causados por el dispositivo. Como ya se comentó en el apartado 3.6, estos valores nulos corresponden a registros del patrón de lectura donde los valores de las coordenadas son cero. Estos valores los registra el propio dispositivo y no tienen relación con la lectura realizada por el usuario. Así, la creación de estos dos ficheros se debe al deseo de mostrar dos tipos de resultados posteriormente, los resultados “puros” obtenidos por el dispositivo y los resultados “reducidos” mediante la eliminación de valores nulos que, previsiblemente, mejorará los resultados.


```

// Files to save reading pattern
ofstream full_file, reduced_file;
string full_reading_pattern = user_folder + "\\full_reading_pattern.txt";
string reduced_reading_pattern = user_folder + "\\reduced_reading_pattern.txt";
full_file.open(full_reading_pattern);
reduced_file.open(reduced_reading_pattern);

// Variables for the main program
clock_t start;
double diff_ms_bef = 0.0;
double diff_ms = 0.0;

// Main program
start = clock();
while (diff_ms < time) {
    // Update time and recalculate difference in milliseconds
    diff_ms = double(clock() - start) / CLOCKS_PER_SEC;

    // To get a frame rate of approximately 30 fps
    if (diff_ms - diff_ms_bef >= 0.03) {
        // Save all information in the full file.
        // Modify value of EyeY because origin coordinate is different.
        full_file << diff_ms << "\t" << Is_fix << "\t" << State << "\t" << LeftEyeX << "\t"
            << (-1 * LeftEyeY) + 1080 << "\t" << LeftEye_pSize << "\t" << LeftEye_pCenterX
            << "\t" << (-1 * LeftEye_pCenterY) + 1080 << "\t" << RightEyeX << "\t"
            << (-1 * RightEyeY) + 1080 << "\t" << RightEye_pSize << "\t" << RightEye_pCenterX
            << "\t" << (-1 * RightEye_pCenterY) + 1080 << "\t" << endl;

        // Save only the instants which there are values. In this case, the coordinate Y is also
        // modified
        if ((LeftEyeX != 0.0) && (RightEyeX != 0.0)) {
            reduced_file << diff_ms << "\t" << Is_fix << "\t" << State << "\t" << LeftEyeX << "\t"
                << (-1 * LeftEyeY) + 1080 << "\t" << LeftEye_pSize << "\t" << LeftEye_pCenterX
                << "\t" << (-1 * LeftEye_pCenterY) + 1080 << "\t" << RightEyeX << "\t"
                << (-1 * RightEyeY) + 1080 << "\t" << RightEye_pSize << "\t" << RightEye_pCenterX
                << "\t" << (-1 * RightEye_pCenterY) + 1080 << "\t" << endl;
        }
        diff_ms_bef = diff_ms;
    }
}
full_file.close();
reduced_file.close();

```

Ilustración 29: Código parte final del main del programa de registro de patrones.

En la siguiente porción de código, se almacenan los valores proporcionados por el rastreador. En esta parte, es necesario destacar varios aspectos, señalados en la ilustración 29 y que corresponden con las siguientes consideraciones.

1. Se comienza realizando una primera comprobación relativa al tiempo. El objetivo de esta comprobación es realizar el registro de valores durante la duración de tiempo indicada por el usuario en la configuración.
2. Posteriormente, existe una nueva comprobación que hace que se tome un valor cada 0.03 segundos, es decir, se almacenan 30 registros por segundo, lo que corresponde a los 30 fps del dispositivo.
3. El siguiente paso es almacenar la información en los ficheros. Como ya se ha comentado, en el fichero “full_reading_pattern.txt” se almacena toda la información proporcionada por el dispositivo.
4. En cambio, en el fichero “reduced_reading_pattern.txt” se almacena la información sin valores nulos. Para ello, es suficiente con añadir la condición de almacenar los valores que sean distintos de 0.0 en las coordenadas X de ambos ojos.

Independientemente de la eliminación de valores nulos, cada columna de los dos ficheros corresponde a una información distinta y cada fila, al valor de esa información en un instante de tiempo. Así, la información almacenada para cada instante se muestra en la siguiente tabla.

Columna	Nombre variable	Descripción
1	Diff_ms	Indica el instante de tiempo en el que se registra en valor dentro de la duración de tiempo indicada por el usuario
2	Is_fix	Determina si el usuario está mirando la pantalla o no.
3	State	Valor entero que determina el estado del dispositivo
4	LeftEyeX	Coordenada X suavizada de la posición del ojo izquierdo
5	LeftEyeY	Coordenada Y suavizada de la posición del ojo izquierdo
6	LeftEye_pSize	Tamaño de la pupila del ojo izquierdo
7	LeftEye_pCenterX	Coordenada X normalizada de la pupila del ojo izquierdo
8	LeftEye_pCenterY	Coordenada Y normalizada de la pupila del ojo izquierdo
9	RightEyeX	Coordenada X suavizada de la posición del ojo derecho
10	RightEyeY	Coordenada Y suavizada de la posición del ojo derecho
11	RightEye_pSize	Tamaño de la pupila del ojo derecho
12	RightEye_pCenterX	Coordenada X normalizada de la pupila del ojo derecho
13	RightEye_pCenterY	Coordenada Y normalizada de la pupila del ojo derecho

Tabla 5: Información de las columnas de los ficheros del registro del patrón de lectura.

De estos valores almacenados hay que destacar lo siguiente:

- Como se ha observado en el código, es necesario realizar un cambio en el valor de las coordenadas Y de todos los valores almacenados. Esta modificación se debe a que el dispositivo toma como origen la esquina superior izquierda de la pantalla mientras que, en las imágenes resultantes, el origen de coordenados corresponde a la esquina inferior izquierda. Por este motivo, hay que realizar esta traslación del origen de coordenadas.
- En la documentación del dispositivo no se especifica la diferencia entre las opciones “raw”, “smoothed” y “normalized”. Lo único que se sabe al respecto es que tanto “smoothed” como “normalized” mejoran las coordenadas obtenidas. Además, tampoco se especifica el procedimiento mediante el cual se obtiene los diferentes valores mostrados.
- A pesar de almacenar todos los valores proporcionados por el dispositivo, en esta aplicación no se han utilizado todos ellos. Los valores utilizados han sido los remarcados en la tabla superior. No obstante, se almacenan el resto de valores para poder ampliar la generación de resultados de la aplicación en el futuro.

4.2.3. Programa de generación de resultados del seguimiento ocular

Con este programa se generan los diferentes resultados del registro de la lectura del usuario. En este apartado, se comentarán los principales detalles de la implementación. No obstante, el código completo se incluirá en el anexo 3 de esta memoria.

En la imagen inferior se muestra el inicio del *main* del programa de generación de resultados del seguimiento ocular. La primera parte de esta implementación es similar al programa de registro de patrones ya comentado. Lo primero, es realizar la lectura de los ficheros “*Setting_file.txt*” y “*Users.txt*” de los cuales se obtendrá el fichero de lectura, la duración de la lectura, la carpeta de resultados y el identificador del usuario. A continuación, y al igual que en el programa anterior, se realiza el cambio de formato de la ruta del fichero de lectura y del directorio donde se almacenarán los resultados del usuario.

En la segunda parte, se crean dos carpetas “*png_left*” y “*png_right*” dentro de la carpeta de resultados. El uso de estos directorios será comentado más adelante. No obstante, se adelanta que la creación de estas dos carpetas es necesaria para la generación de los videos del patrón de lectura. En la última sección del código, se definen otras variables para definir las rutas y nombres de los ficheros resultantes del programa.

```
// Variables and Previous procedures to show results correctly
// Get the file reading, time and results folder from setting file
string reading_file;
float time = 0.0;
string results_folder;
getFileTimeFolder(reading_file, time, results_folder);

// Get the user id
string user_id;
getUserId(user_id);

// Change format of the reading_file path and results folder to be accepted
changeFormat(reading_file);
changeFormat(results_folder);
```

1º Parte

```
// Create a folders inside user folder
string user_folder = results_folder + "\\" + user_id;
string png_left = user_folder + "\\png_left";
namespace fs = std::experimental::filesystem;
// Check if that folder exists
if (!fs::exists(png_left)) {
    fs::create_directory(png_left);
}
string png_right = user_folder + "\\png_right";
// Check if that folder exists
if (!fs::exists(png_right)) {
    fs::create_directory(png_right);
}
```

2º Parte

```
// String with full_reading_pattern and reduced_reading_pattern
string full_reading_pattern = user_folder + "\\full_reading_pattern.txt",
string reduced_reading_pattern = user_folder + "\\reduced_reading_pattern.txt";

// Path results
string full_left_path = user_folder + "\\Left_full.png";
string full_right_path = user_folder + "\\Right_full.png";
string left_path = user_folder + "\\Left.png";
string right_path = user_folder + "\\Right.png";
string left_color = user_folder + "\\Left_color.png";
string right_color = user_folder + "\\Right_color.png";
string left_pupil = user_folder + "\\Left_pupil.png";
string right_pupil = user_folder + "\\Right_pupil.png";
```

3º Parte

Ilustración 30: Código parte inicial del main del programa de generación de resultados.

Finalmente, se muestra la parte de generación de resultados. Esta parte comienza con la generación de un objeto de la clase Gnuplot que nos va a permitir hacer uso de Gnuplot y de sus comandos para la generación de los resultados desde Visual Studio 2015. El resto de la implementación corresponde a la generación de los diferentes ficheros resultantes que se irán comentando individualmente. En primer lugar, se generan los ficheros *“Left_full.png”* y *“Right_full.png”* que muestran el patrón de lectura sobre la imagen del fichero de lectura. Para obtener estos resultados se ha utilizado la información completa del dispositivo, es decir, el fichero *“full_reading_pattern.txt”*. La implementación de estos resultados es la que se muestra en la ilustración 31.

```
// FULL reading pattern
// Plot with path
// Left
plot("set xrange [0:1919]");
plot("set yrange [0:1079]");
plot("set title 'Left'");
plot("unset key"); // Hide legend
plot("set terminal png");
plot("set output '' + full_left_path);
plot("plot '' + reading_file + '' binary filetype = png w rgbimage, '' + full_reading_pattern + '' using 4:5 with lines");

// Right
plot("set xrange [0:1919]");
plot("set yrange [0:1079]");
plot("set title 'Right'");
plot("unset key"); // Hide legend
plot("set terminal png");
plot("set output '' + full_right_path);
plot("plot '' + reading_file + '' binary filetype = png w rgbimage, '' + full_reading_pattern + '' using 9:10 with lines");
```

Ilustración 31: Generación de resultados: " Left_full.png " y " Right_full.png".

A continuación, se generan los ficheros *“Left.png”* y *“Right.png”* que representan el patrón de lectura sobre la imagen del fichero de lectura, pero en este caso, se utiliza la información de *“reduced_reading_pattern.txt”*. La implementación es similar al anterior solo cambia el fichero de datos utilizado (véase ilustración 32).

```
// Plots with path
// Left
plot("set xrange [0:1919]");
plot("set yrange [0:1079]");
plot("set title 'Left'");
plot("unset key"); // Hide legend
plot("set terminal png");
plot("set output '' + left_path);
plot("plot '' + reading_file + '' binary filetype = png w rgbimage, '' + reduced_reading_pattern + '' using 4:5 with lines");

// Right
plot("set xrange [0:1919]");
plot("set yrange [0:1079]");
plot("set title 'Right'");
plot("unset key"); // Hide legend
plot("set terminal png");
plot("set output '' + right_path);
plot("plot '' + reading_file + '' binary filetype = png w rgbimage, '' + reduced_reading_pattern + '' using 9:10 with lines");
```

Ilustración 32: Generación de resultados: " Left.png " y " Right.png".

El resto de resultados mostrados a partir de ahora, se generan a partir del fichero *“reduced_reading_pattern.txt”*, es decir, se eliminan los valores nulos. Los siguientes resultados son los ficheros *“Left_color.png”* y *“Right_color.png”* que muestra el patrón de lectura registrado de cada ojo sobre el fichero de lectura (similar al resultado anterior) pero, en este caso, le añade la componente tiempo mediante una escala de color que permite conocer la progresión de la lectura. Este procedimiento esta implementado en el siguiente fragmento.

```

// Plots with path and line time
// Times in String
int div = int(time / 3);
string div0 = to_string(0);
string div1 = to_string(div);
string div2 = to_string(div * 2);
string total_time = to_string(time);
// Left
plot("set xrange [0:1919]");
plot("set yrange [0:1079]");
plot("set title 'Left with time'");
plot("unset key");
plot("set terminal png");
plot("set output "" + left_color);
plot("set cbrange[0: "" + total_time + "']");
plot("set palette defined("" + div0 + "" 'red', "" + div1 + "" 'yellow', "" + div2 + "" 'green', "" + total_time + "" 'blue')");
plot("plot "" + reading_file + "" binary filetype = png w rgbimage, "" + reduced_reading_pattern + "" using 4:5:1 with lines linecolor palette linewidth 1");

// Right
plot("set xrange [0:1919]");
plot("set yrange [0:1079]");
plot("set title 'Right with time'");
plot("unset key");
plot("set terminal png");
plot("set output "" + right_color);
plot("set cbrange[0: "" + total_time + "']");
plot("set palette defined("" + div0 + "" 'red', "" + div1 + "" 'yellow', "" + div2 + "" 'green', "" + total_time + "" 'blue')");
plot("plot "" + reading_file + "" binary filetype = png w rgbimage, "" + reduced_reading_pattern + "" using 9:10:1 with lines linecolor palette linewidth 1");

```

Ilustración 33: Generación de resultados: "Left_color.png" y "Right_color.png".

A continuación, se generan las gráficas “Left_pupil.png” y “Right_pupil.png” en las que se muestra el tamaño de la pupila durante el registro de la lectura del ojo izquierdo y derecho, respectivamente. El código correspondiente a este procedimiento es el siguiente.

```

// Plots with Evolution of pupil size in the time
// Left
plot("set xrange [0: "" + total_time + "']");
plot("set yrange [0:200]");
plot("set title 'Left: Pupil size vs time'");
plot("unset key");
plot("set terminal png");
plot("set output "" + left_pupil);
plot("plot "" + reduced_reading_pattern + "" using 1:6 with lines");

// Right
plot("set xrange [0: "" + total_time + "']");
plot("set yrange [0:200]");
plot("set title 'Right: Pupil size vs time'");
plot("unset key");
plot("set terminal png");
plot("set output "" + right_pupil);
plot("plot "" + reduced_reading_pattern + "" using 1:11 with lines");

```

Ilustración 34: Generación de resultados: "Left_pupil.png" y "Right_pupil.png".

Finalmente, se generan los videos “Left_movie.mpeg” y “Right_movie.png”. Estos videos muestran el patrón de lectura del ojo izquierdo y derecho durante un determinado tiempo. Para la generación de estos videos es necesario crear un frame por cada instante de tiempo y después, juntar todos estos frames para obtener el video resultante. Todos los frames generados para ambos ojos se almacenan en las carpetas “png_left” y “png_right” ya comentadas anteriormente. La generación de los frames se ha limitado a 210 debido al tiempo necesario para la generación de los frames y la creación del video. Además, es importante recordar que este procedimiento de generación de resultados está incluido en la aplicación, por lo tanto, debe de terminar antes de que el usuario cierre la aplicación. No obstante, la cantidad de frames fijados se puede modificar en función de la duración del video que se desee generar y siempre que la ejecución del procedimiento se realice posteriormente al uso de la aplicación por parte del usuario. En este caso, para la cantidad de frames fijada, la duración del video es de 7 segundos, para un tiempo de lectura de 20 segundos y una tasa de muestreo de 30 fps.

5. Evaluación de la aplicación

En este apartado, se comentan los principales detalles del procedimiento de evaluación realizado para la aplicación de registro de patrones de lectura resultante de este trabajo. En primer lugar, se determinan los objetivos de la evaluación. A continuación, se describen las características de los textos de lectura utilizados y finalmente, se especifican los detalles del procedimiento de evaluación incluyendo información relevante sobre los usuarios que han realizado este procedimiento.

5.1. Objetivos de la evaluación

Los principales objetivos del procedimiento de evaluación llevado a cabo son los siguientes:

- Comprobar la calidad de los resultados obtenidos por la aplicación de registro de patrones de lectura resultante.
- Analizar los resultados obtenidos en base a la dificultad del texto.
- Analizar la posibilidad del uso de esta aplicación para el diagnóstico de distintas patologías.
- Realizar un análisis preliminar de los patrones de lectura obtenidos por los distintos usuarios.

5.2. Textos para la lectura

Uno de los aspectos más importante del registro de patrones de lectura y, por tanto, de la aplicación desarrollada es el texto de lectura. Para realizar la evaluación de la aplicación se van a utilizar diferentes formatos de texto para cumplir con los objetivos planteados para esta evaluación.

Para determinar las características de los textos utilizados para la lectura nos vamos a basar en las recomendaciones comentadas en el apartado 2.7. Se recuerda que estas recomendaciones se dividían en dos aspectos: la dificultad de la lectura y las características de diseño del texto. Para lo primero, se ha decidido trabajar con seis textos con diferentes niveles de dificultad, tres de lectura sencilla y tres de lectura más avanzada. Los tres primeros ficheros, correspondientes a una lectura sencilla para una persona adulta con un nivel de lectura estándar, corresponden a la parte inicial de diferentes cuentos adaptados para niños de primaria (6 a 12 años de edad). Los cuentos incluidos son los siguientes:

- Fichero 1: Caperucita roja:
<http://www.cuentosinfantilesadormir.com/cuento-caperucitaroja.htm>
- Fichero 2: Los tres cerditos:
<http://www.cuentosinfantilesadormir.com/cuento-lostrescerditos.htm>
- Fichero 3: Pocahontas:
<http://www.cuentosinfantilesadormir.com/cuento-pocahontas.htm>

Los tres últimos ficheros, de una semántica más compleja, corresponde al resumen inicial de un artículo científico de medicina, una sección de un Boletín Oficial del Estado y un artículo del periódico.

- Fichero 4: Medicina:
<http://www.elsevier.es/es-revista-revista-medicina-e-investigacion-353-articulo-estructura-sistemas-analisis-costos-atencion-S2214310615000394>
- Fichero 5: Boletín Oficial del Estado:
<https://www.boe.es/boe/dias/2016/12/12/pdfs/BOE-A-2016-11791.pdf>
- Fichero 6: Artículo del periódico:
http://internacional.elpais.com/internacional/2016/12/14/actualidad/1481712122_244406.html

Respecto a las características del diseño del texto, las principales recomendaciones comentadas estaban más orientadas a facilitar la lectura de personas con dislexia. No obstante, la clasificación también puede ser utilizada para un uso más general. Así, las principales características a decidir son el tipo de letra, color de letra y de fondo, tamaño de la fuente, espaciado entre líneas y espaciado entre párrafos. En este sentido, se ha optado por mantener una combinación de característica que permitiera la lectura del texto claramente. Por ese motivo, todos los textos anteriormente comentados tendrán las siguientes características:

- Tipo de letra: Arial.
- Colores: Texto negro y Fondo blanco
- Tamaño de la fuente: 22.
- Interlineado 2.0

5.3. Procedimiento de evaluación de la aplicación

En las siguientes secciones se especifican los detalles de la evaluación realizada con el fin de cumplir los objetivos comentados en el apartado 5.1.

5.3.1. Usuarios finales

La evaluación de la aplicación se ha realizado con 5 usuarios a los que denominaremos usuario 1, usuario 2, etc. Los principales aspectos a destacar de los usuarios son los siguientes:

- Tienen edades comprendidas entre 22 – 26 años.
- Ninguno de los cinco usuarios padece un trastorno grave en la visión que le impida realizar la lectura con normalidad.
- Todos ellos son universitarios lo que indica que no presentan ninguna dificultad para la lectura de textos complejos.
- El usuario 5 conocía los textos de lectura, es decir, había leído los textos de lectura anteriormente.

5.3.2. Evaluación de la aplicación

Lugar

El lugar utilizado para la evaluación se caracteriza por ser un lugar silencioso y sin posibles distracciones para el usuario. Además, se ha utilizado una mesa y silla fijas para evitar posibles movimientos del dispositivo y/o del usuario.

Fecha y hora del día

La validación se ha realizado durante los días 15 y 16 de diciembre de 2016 en horario de tarde.

Equipo de trabajo

Para realizar la evaluación ha sido necesario un ordenador, en este caso, ordenador portátil con un tamaño de pantalla 1920 x 1080 y, el dispositivo de The Eye Tribe. Como se ha utilizado un ordenador portátil, no se ha usado el soporte de elevación del dispositivo. Para ello, se ha creado un sistema de fijación moldeable que ha permitido situar al dispositivo en la posición correcta. No obstante, el sistema para situar el dispositivo no es tan relevante ya que el usuario realiza la calibración del dispositivo en cada una de las pruebas lo que garantiza que el usuario y el dispositivo están en la posición correcta. En este sentido, lo importante es que el dispositivo y el usuario permanezcan en la misma posición una vez realizada la calibración.

Descripción

La evaluación de la aplicación ha consistido en realizar diferentes pruebas de su funcionalidad. En cada una de estas pruebas, se ha utilizado uno de los seis textos anteriormente comentados. Cada usuario ha realizado las seis pruebas de manera consecutiva con intervalos de descanso de 2 minutos para evitar el cansancio del usuario con la aplicación. La duración de la lectura se ha fijado a 20 segundos para todos los textos. Por lo tanto, la duración de cada sesión de evaluación ha sido de aproximadamente 15 minutos.

Por otro lado, también se han registrado los comentarios y opiniones de los usuarios durante la evaluación.

6. Resultados

En este apartado, se van a comentar los resultados de las pruebas de validación obtenidos por los distintos usuarios teniendo en cuenta los objetivos del procedimiento de evaluación comentados en el apartado 5.1. No obstante, también se realizarán algunos comentarios adicionales de los patrones de lectura resultantes.

Debido a la cantidad de ficheros obtenidos de cada usuario y con la intención de centrar los resultados en los aspectos más relevantes, en este apartado se van a mostrar y comentar solamente los ficheros “Left_color.png” y “Right_color.png” de todos los textos de lectura seleccionados para la evaluación. Se han escogido estos datos frente al resto debido a que, en ellos, se puede apreciar de una forma directa el patrón de lectura del usuario y su avance en el tiempo. Esta evolución se representa mediante un cambio de color en el trazo del propio patrón de lectura. La barra lateral de color en estas imágenes indica el cambio de color en el tiempo de lectura permitiendo conocer la evolución de la lectura del usuario en el tiempo.

No obstante, y como ya se ha comentado en otros apartados, se han generado otros resultados que se pueden descargar y analizar más exhaustivamente del siguiente enlace.

<https://mega.nz/#!s403HRjK!ILUeRjMiFvQFZivSDjvDen-ZjaXTKfelAHDD8ZInF3k>

En estos resultados, también se incluye un directorio “Videos_Usuario3” que contiene todos los videos de la evolución del patrón de lectura al completo de los distintos ficheros leídos por el usuario 3. La duración de cada uno de los videos es de 20 segundos, tiempo fijado para la lectura de los textos. Estos videos se han creado con una ejecución del programa de generación de resultados posterior al uso de la aplicación por parte del usuario 3 y utilizando el fichero de registro del patrón de lectura obtenido del procedimiento de evaluación realizado.

6.1. Análisis cualitativo

6.1.1. Usuario 1

Los resultados obtenidos del seguimiento del patrón de lectura de los distintos documentos por el usuario 1 son los siguientes.

Fichero 1: Caperucita Roja

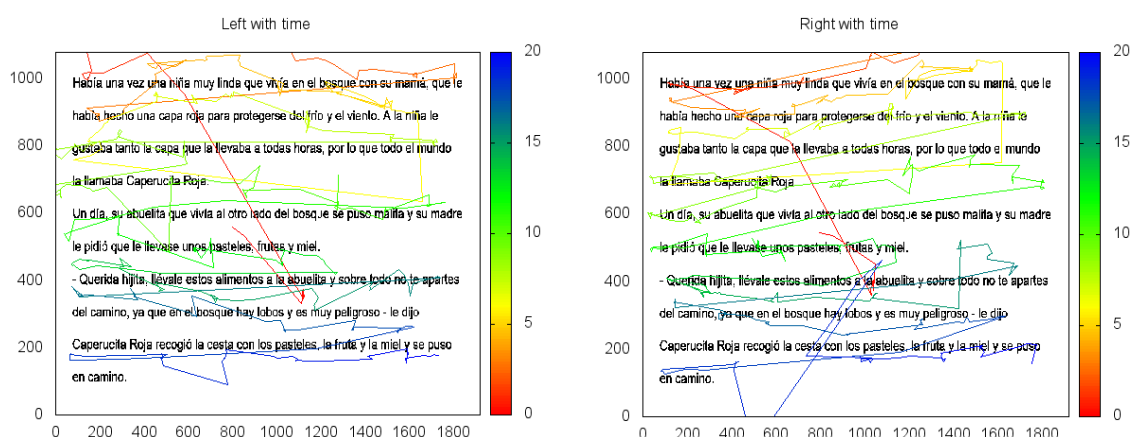


Ilustración 35: Usuario 1: Resultados del texto del fichero 1

Fichero 2: Los tres cerditos

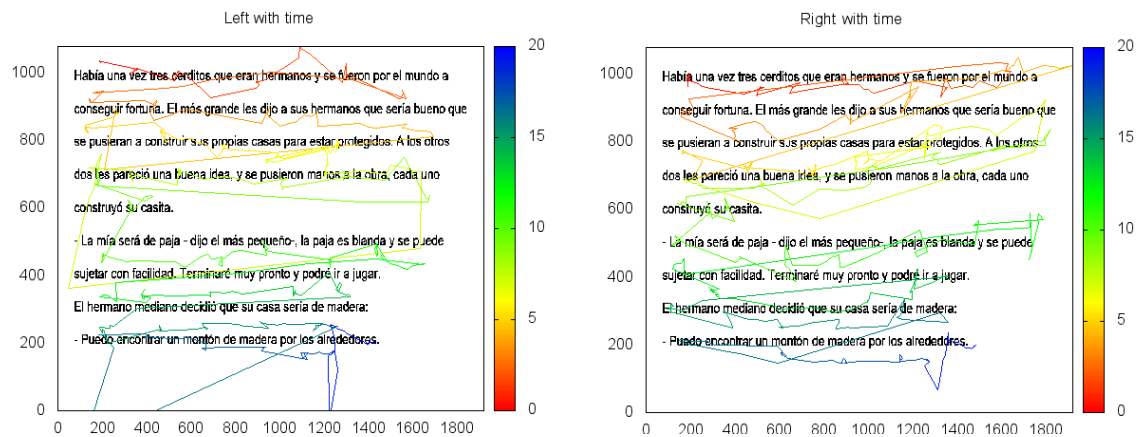


Ilustración 36: Usuario 1: Resultados del texto del fichero 2.

Fichero 3: Pocahontas

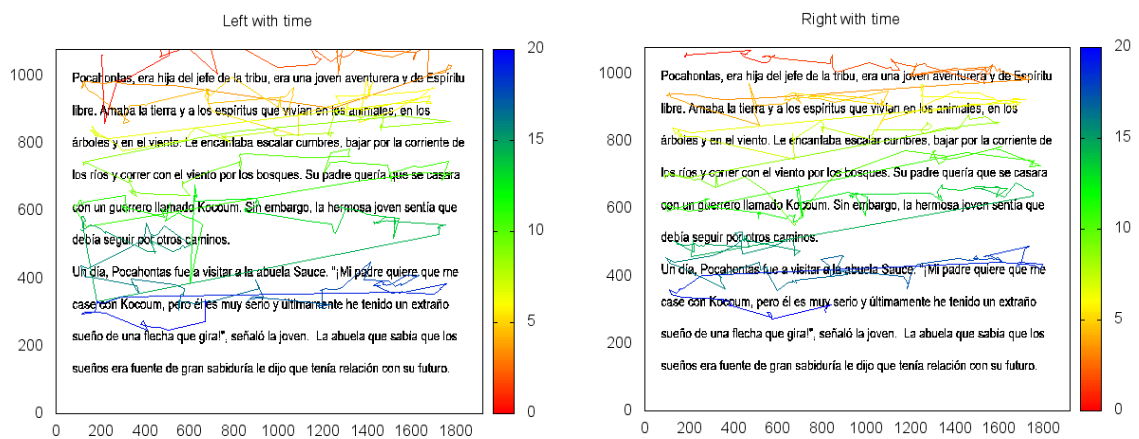


Ilustración 37: Usuario 1: Resultados del texto del fichero 3.

Fichero 4: Artículo de Medicina

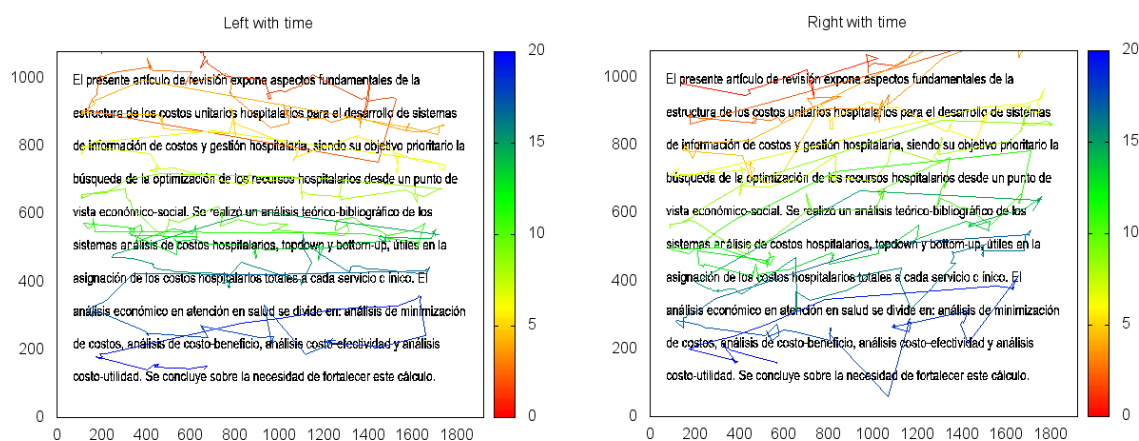


Ilustración 38: Usuario 1: Resultados del texto del fichero 4.

Fichero 5: Boletín Oficial del Estado

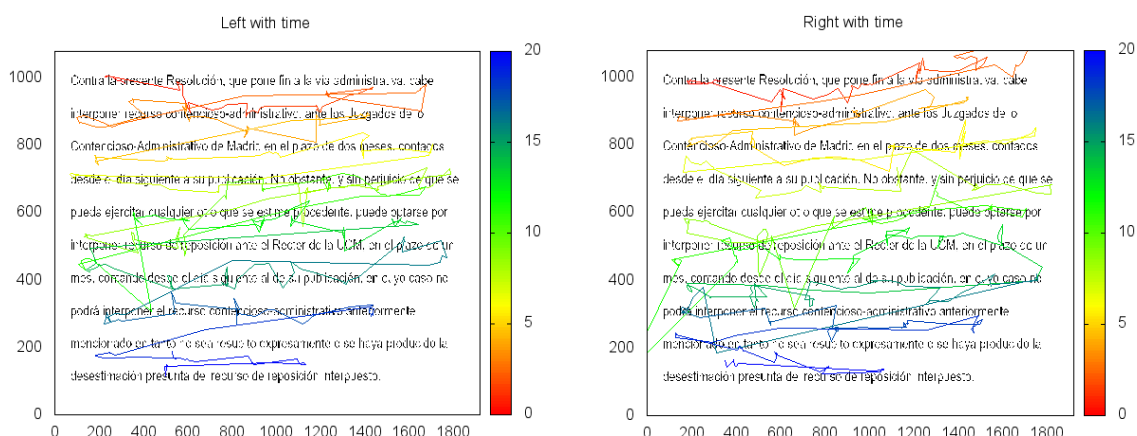


Ilustración 39: Usuario 1: Resultados del texto del fichero 5.

Fichero 6: Artículo del periódico

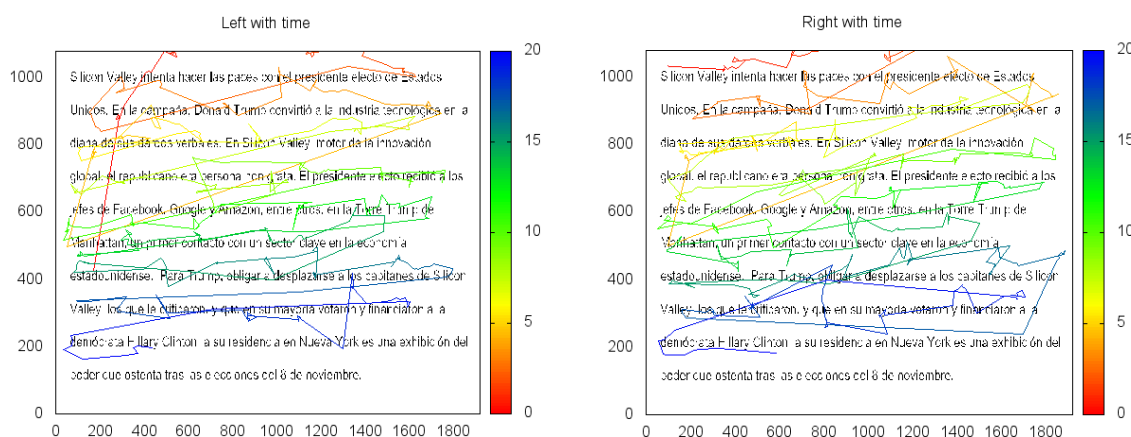


Ilustración 40: Usuario 1: Resultados del texto del fichero 6.

Comentarios

En general, este usuario ha seguido más o menos las líneas de lectura. Como se ve en las imágenes, los patrones de lectura no se encuentran exactamente sobre las líneas de los textos. Además, el patrón de lectura no es una línea recta, a lo largo del patrón se producen varios desplazamientos hacia arriba y hacia atrás.

En el análisis cualitativo no se aprecian grandes diferencias en el patrón de lectura entre los textos más fáciles de leer y los más complejos. Es más, la longitud del patrón de lectura registrado es más o menos similar en todos los ficheros salvo en los dos primeros, en los cuales el usuario ha leído el texto completamente en los 20 segundos de duración del procedimiento. Para el resto de textos, el usuario ha confirmado que no ha tenido el tiempo suficiente para realizar la lectura completamente.

6.1.2. Usuario 2

Los resultados del usuario 2 para los distintos ficheros de lectura se muestran a continuación.

Fichero 1: Caperucita Roja

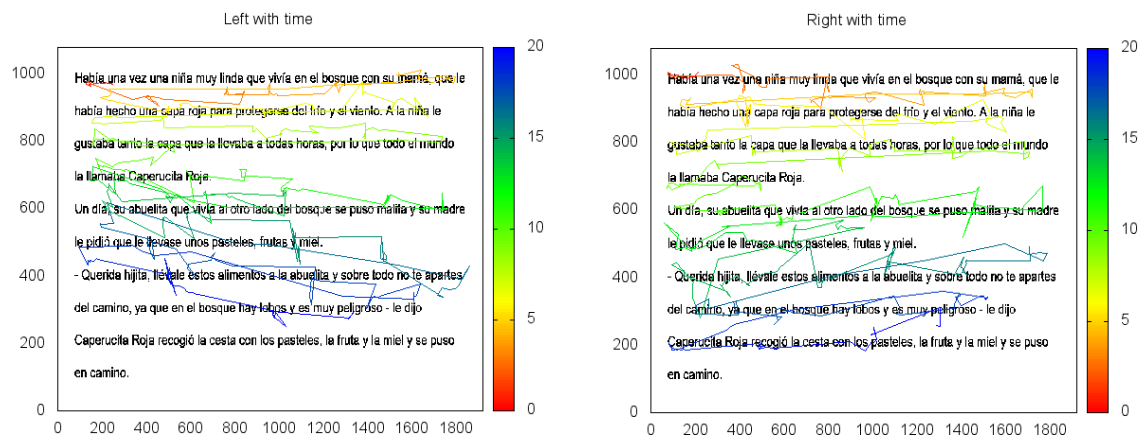


Ilustración 41: Usuario 2: Resultados del texto del fichero 1.

Fichero 2: Los tres cerditos

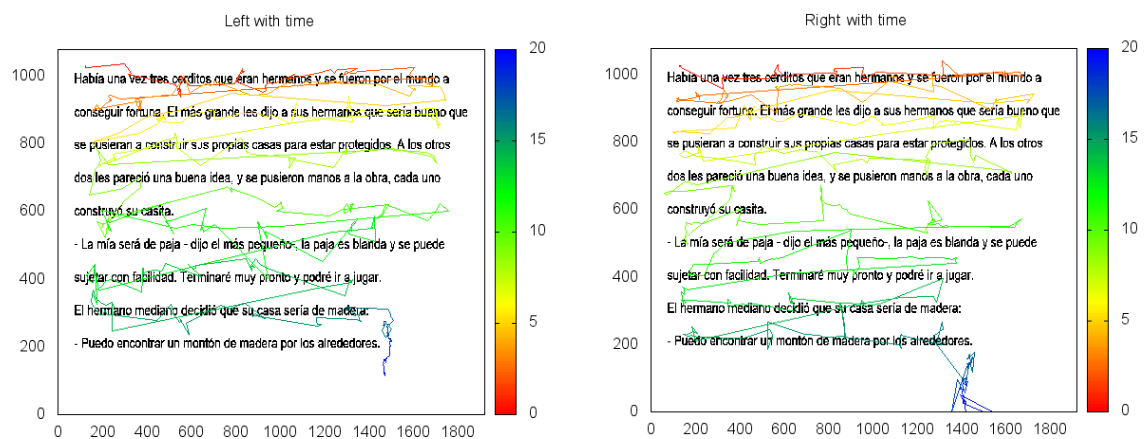


Ilustración 42: Usuario 2: Resultados del texto del fichero 2.

Fichero 3: Pocahontas

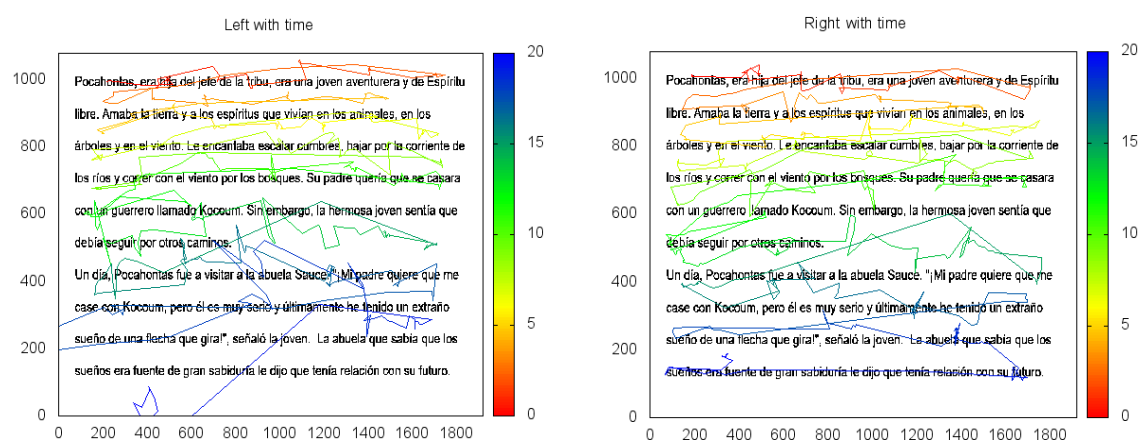


Ilustración 43: Usuario 2: Resultados del texto del fichero 3.

Fichero 4: Artículo de Medicina

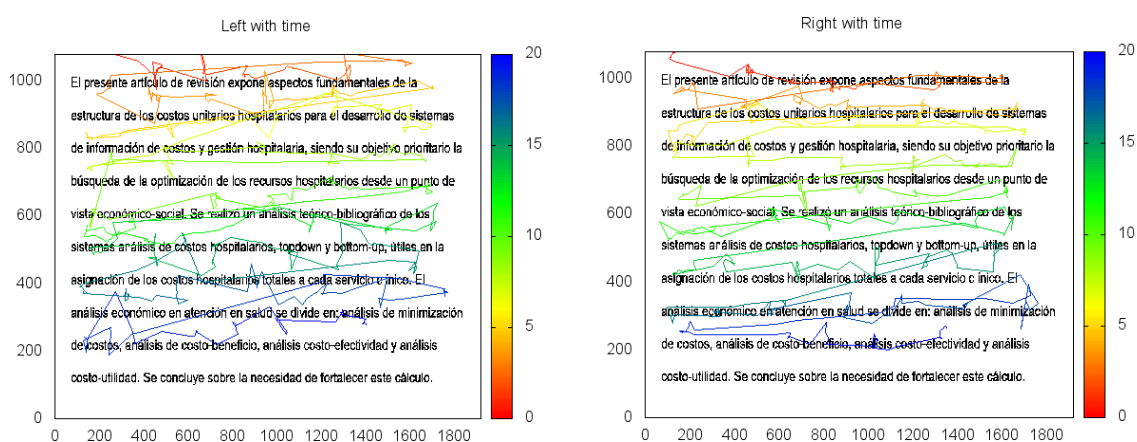


Ilustración 44: Usuario 2: Resultados del texto del fichero 4.

Fichero 5: Boletín Oficial del Estado

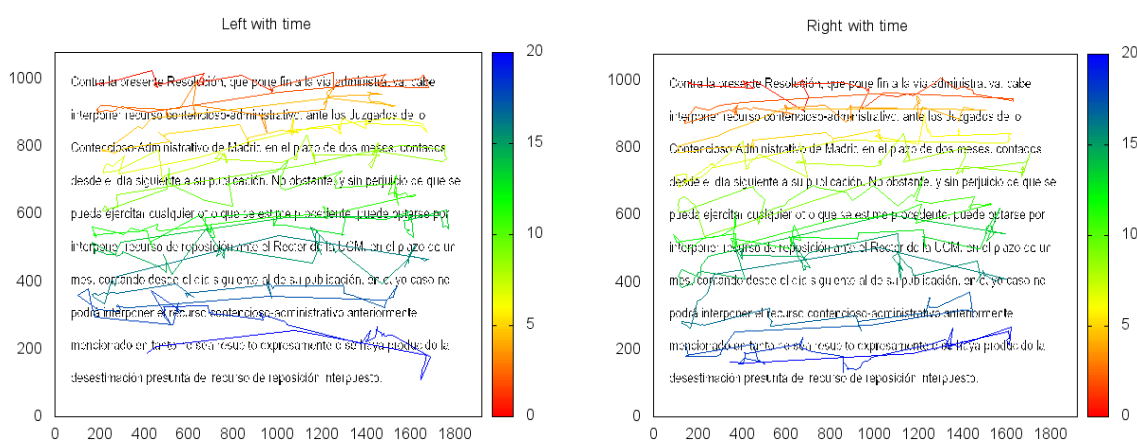


Ilustración 45: Usuario 2: Resultados del texto del fichero 5.

Fichero 6: Artículo del periódico

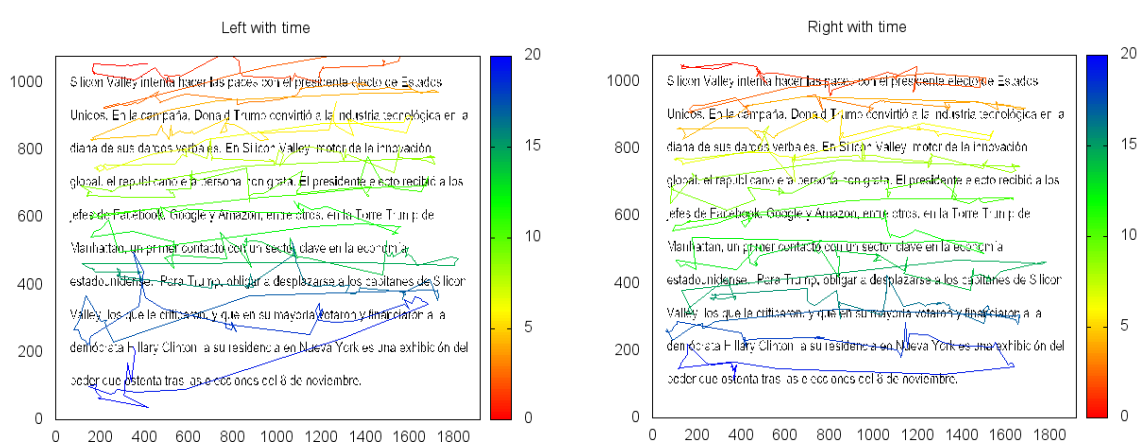


Ilustración 46: Usuario 2: Resultados del texto del fichero 6.

Comentarios

Al igual que el usuario 1, en general, el usuario 2 ha seguido más o menos bien las líneas de lectura. Los patrones de lectura vuelven a no estar exactamente sobre las líneas de lectura del texto, pero su trazo es más o menos lógico. Para este usuario, también se aprecian pequeños

desplazamientos en determinados instantes del patrón de lectura, tanto hacia arriba como hacia atrás.

Destacan las imágenes correspondientes al ojo izquierdo del primer fichero (ilustración 41) y las dos imágenes correspondientes al fichero 3 (ilustración 43). En la primera imagen, se puede ver como el trazo de lectura es más diagonal que en el resto de imágenes resultantes. En las otras dos imágenes, se observa como el usuario ha seguido la lectura a pesar de existir un espacio en blanco entre los distintos párrafos y, después de este instante, el patrón de lectura es más irregular. Por otro lado, en algunas de las imágenes mostradas se puede apreciar que el trazo no comienza al principio de las líneas de lectura. Este hecho se debe al interés del usuario de realizar la lectura lo más rápidamente posible (comentario realizado por el propio usuario).

Respecto a la dificultad de los textos, no existe una diferencia significativa. La longitud de los diferentes patrones es similar en todos los casos salvo para el fichero 2. En estas imágenes si se puede ver que el usuario ha completado la lectura del texto. Por último, y como ya le ocurría al usuario 1, este usuario ha confirmado durante la realización del procedimiento de evaluación que no ha tenido tiempo suficiente para completar la lectura del texto en el tiempo establecido.

6.1.3. Usuario 3

Los resultados obtenidos por el usuario 3 son los siguientes.

Fichero 1: Caperucita Roja

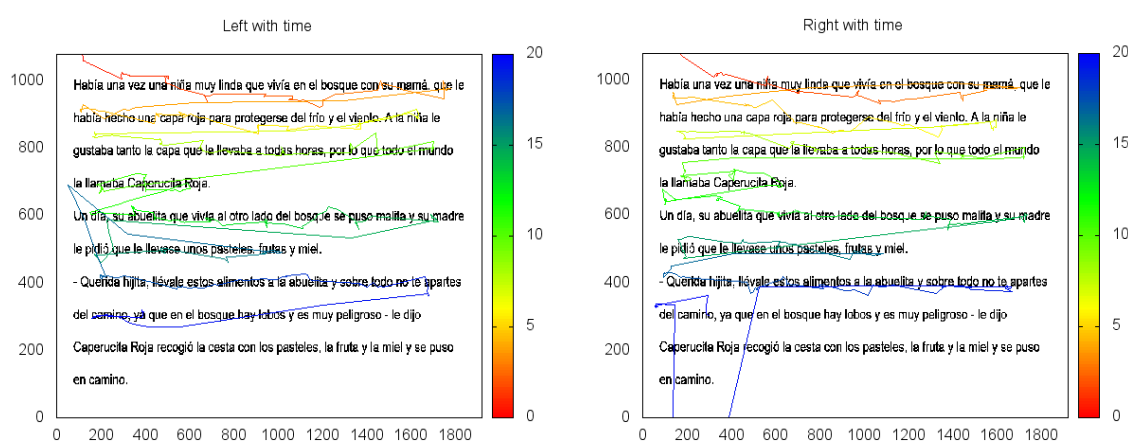


Ilustración 47: Usuario 3: Resultados del texto del fichero 1.

Fichero 2: Los tres cerditos

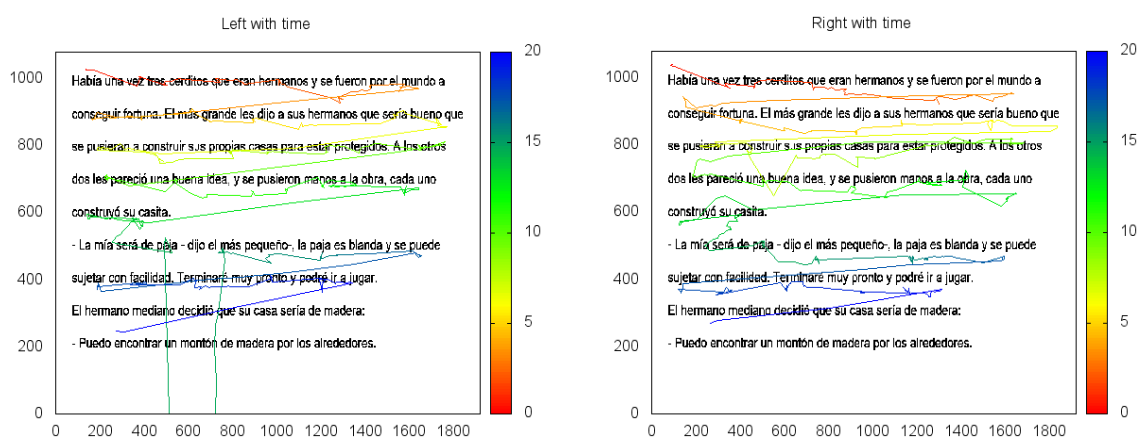


Ilustración 48: Usuario 3: Resultados del texto del fichero 2.

Fichero 3: Pocahontas

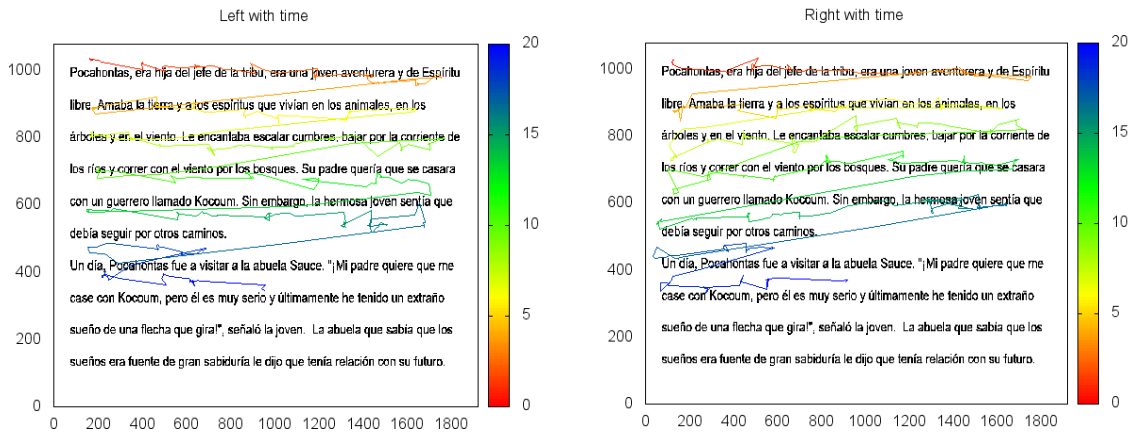


Ilustración 49: Usuario 3: Resultados del texto del fichero 3.

Fichero 4: Artículo de Medicina

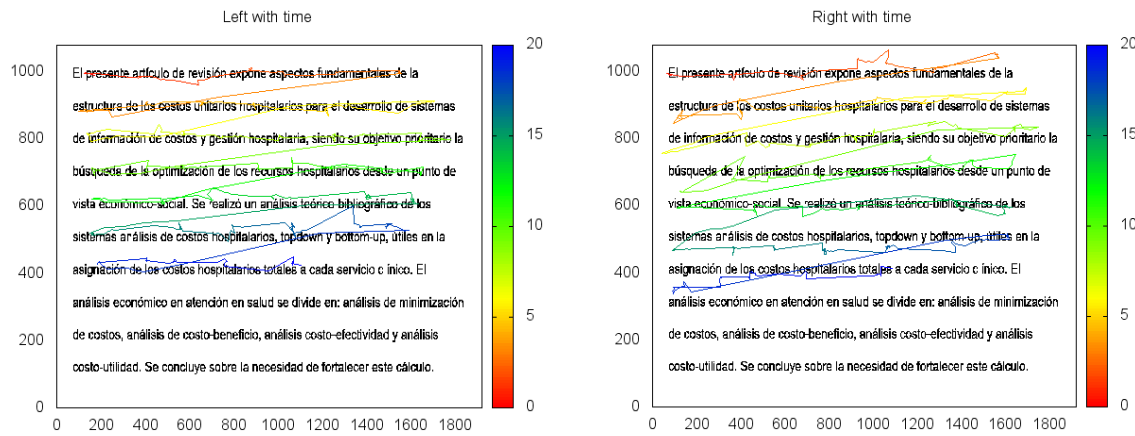


Ilustración 50: Usuario 3: Resultados del texto del fichero 4.

Fichero 5: Boletín Oficial del Estado

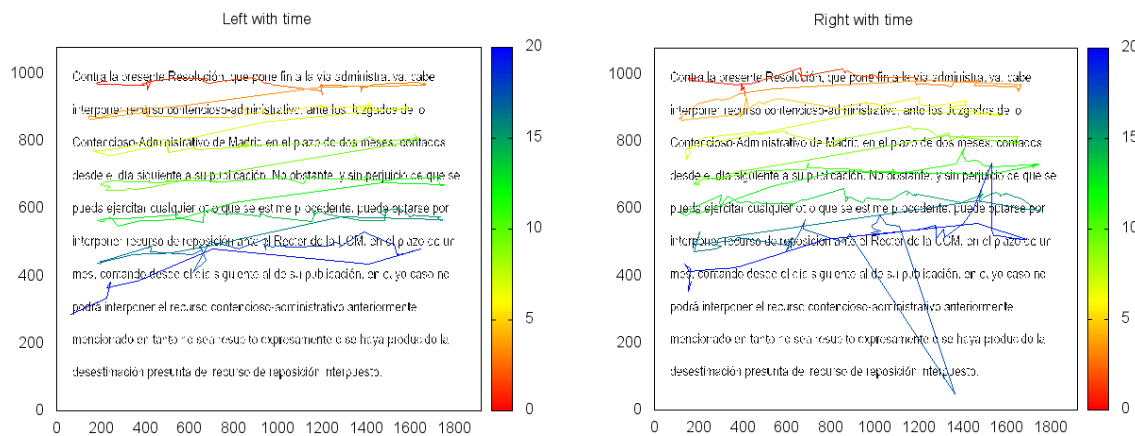


Ilustración 51: Usuario 3: Resultados del texto del fichero 5.

Fichero 6: Artículo del periódico

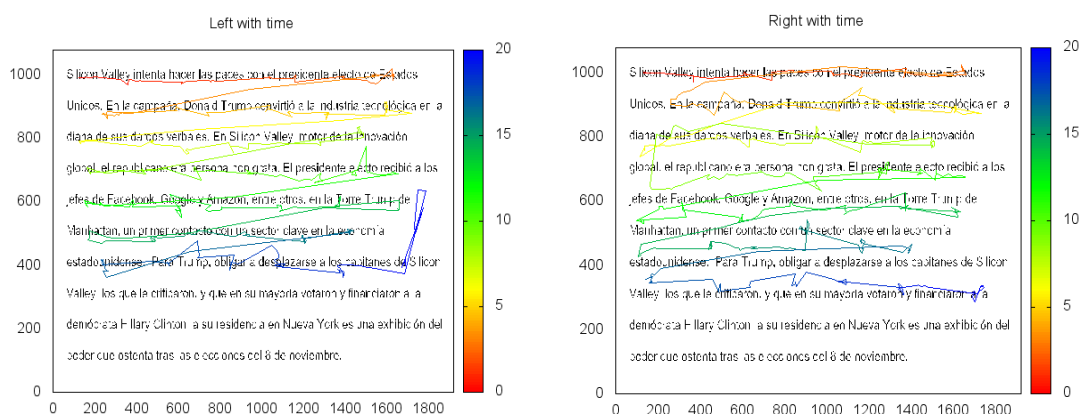


Ilustración 52: Usuario 3: Resultados del texto del fichero 6.

Comentarios

A nivel general, el patrón de lectura de este usuario sigue las líneas de lectura mejor que los usuarios anteriores. Los trazos de los patrones de lectura están aproximadamente sobre las líneas del texto. Además, no existen tantos pequeños desplazamientos hacia atrás y hacia arriba, lo que hace que los patrones de lectura mantengan mejor su linealidad. No obstante, en tres imágenes, dos correspondientes al ojo derecho y una al izquierdo, existen grandes desplazamientos verticales. Estos saltos se pueden asociar a movimientos sacádicos del usuario durante la lectura.

La longitud del trazo de lectura es menor que la obtenida por el usuario 1 y 2, es decir, este usuario no llega a leer la misma cantidad de líneas que los usuarios anteriores. Por lo tanto, el usuario ha leído más despacio. También, y al igual que los usuarios anteriores, el usuario 3 ha comentado que le ha faltado tiempo para terminar la lectura de todos los textos.

Por último, no se aprecia ninguna diferencia significativa entre los patrones de lectura de los textos fáciles y difíciles, es más, la longitud del patrón es más o menos similar en los distintos textos.

6.1.4. Usuario 4

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por el usuario 4 del seguimiento del patrón de lectura de los distintos documentos.

Fichero 1: Caperucita Roja

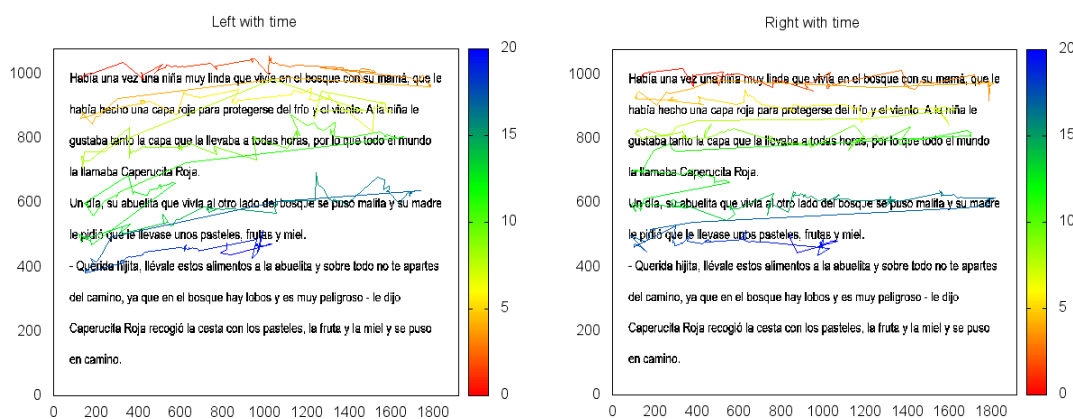


Ilustración 53: Usuario 4: Resultados del texto del fichero 1.

Fichero 2: Los tres cerditos

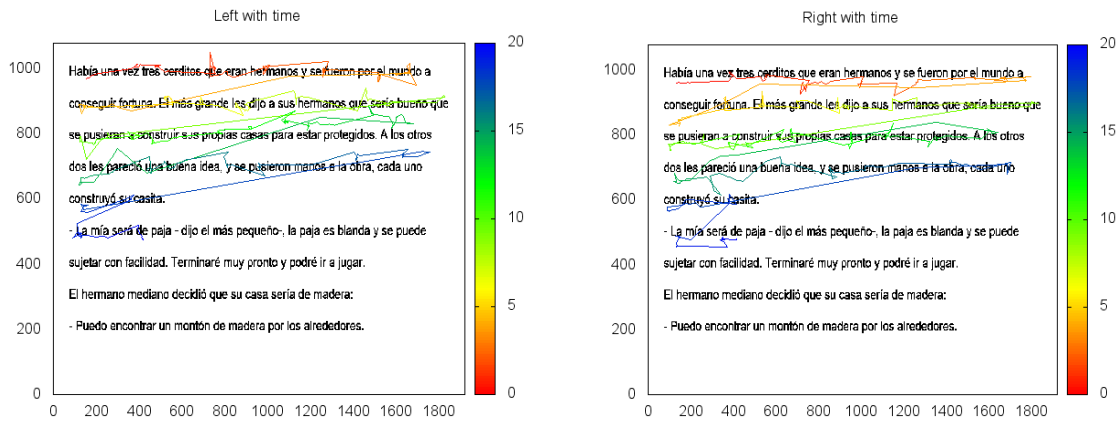


Ilustración 54: Usuario 4: Resultados del texto del fichero 2.

Fichero 3: Pocahontas

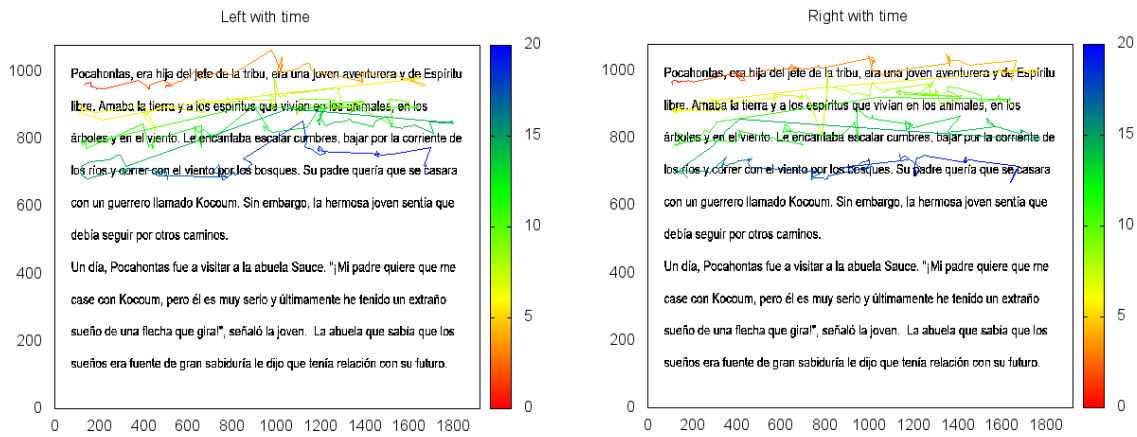


Ilustración 55: Usuario 4: Resultados del texto del fichero 3.

Fichero 4: Artículo de Medicina

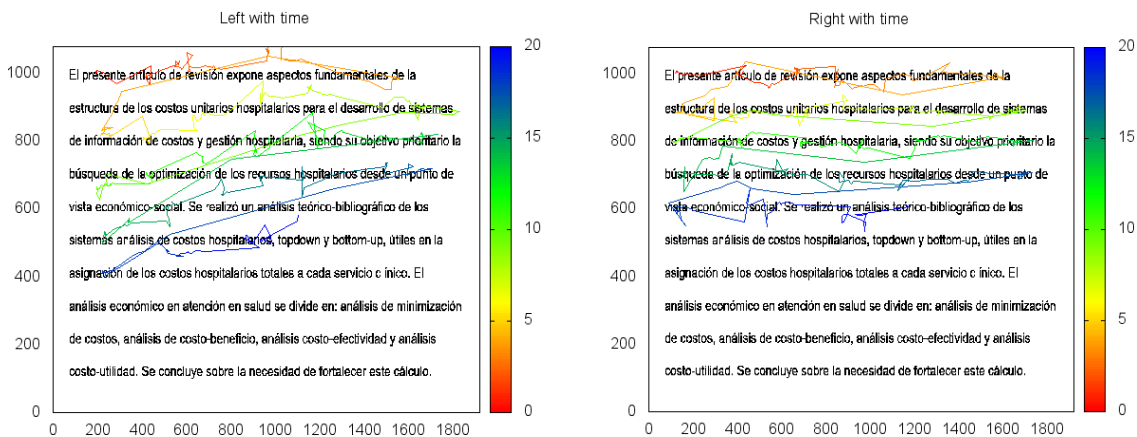


Ilustración 56: Usuario 4: Resultados del texto del fichero 4.

Fichero 5: Boletín Oficial del Estado

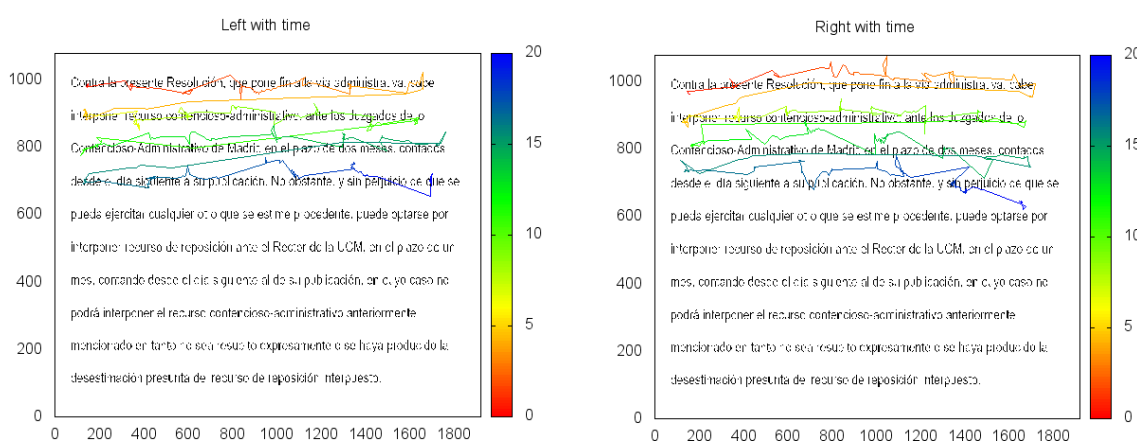


Ilustración 57: Usuario 4: Resultados del texto del fichero 5.

Fichero 6: Artículo del periódico

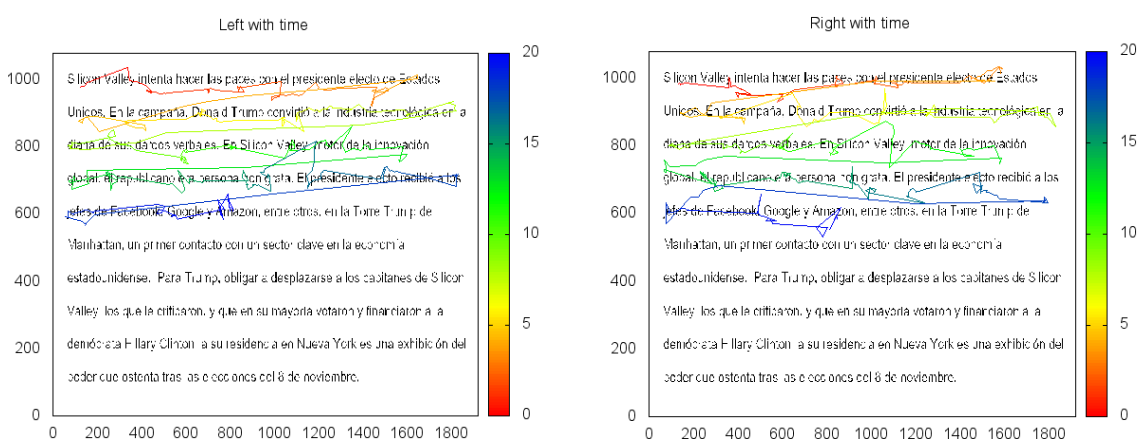


Ilustración 58: Usuario 4: Resultados del texto del fichero 6.

Comentarios

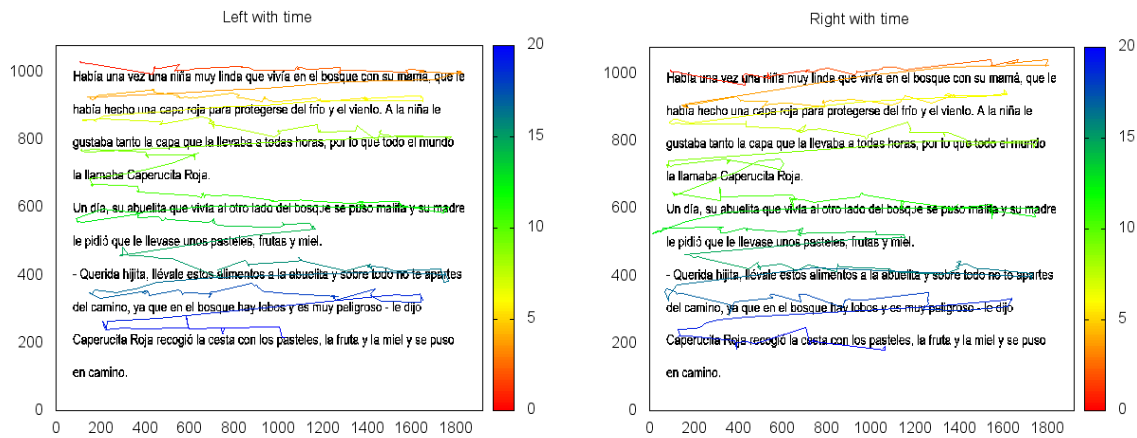
En los resultados de este usuario, también se puede ver que el patrón de lectura se encuentra aproximadamente sobre las líneas del texto. En este caso, se vuelve a apreciar pequeños desplazamientos en todos los patrones, tanto desplazamientos hacia arriba como hacia atrás. No obstante, estos saltos son de menor altura que para usuarios anteriores y, algunas veces, se trata de pequeños círculos que indican la dificultad del usuario con alguna palabra o expresión concreta. Por otro lado, los patrones de lectura de este usuario también se caracterizan por tener una menor longitud. Al igual que para el resto de usuarios, este usuario ha confirmado la dificultad de leer todo el texto en los 20 segundos establecidos para la lectura.

Respecto a la dificultad de los distintos ficheros, no existe una gran diferencia. Lo más destacable es que para los ficheros 1 y 2, correspondientes a textos fáciles, el usuario ha leído más líneas que para el resto de textos presentados.

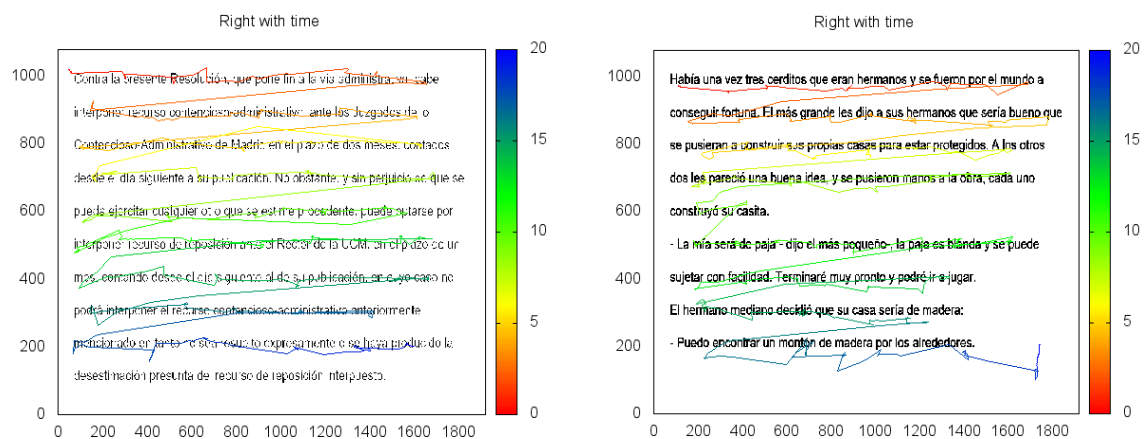
6.1.5. Usuario 5

Los resultados obtenidos por el usuario 5 en los distintos textos son los siguientes.

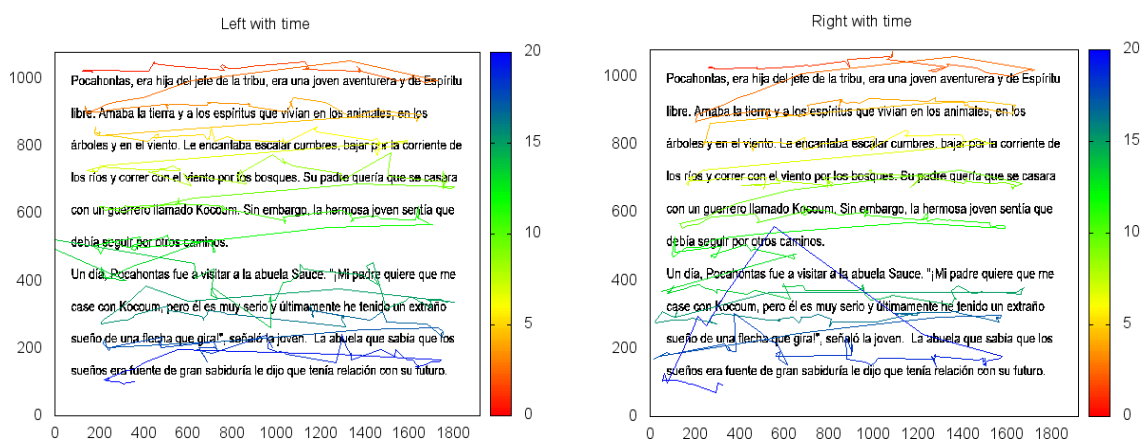
Fichero 1: Caperucita Roja



Fichero 2: Los tres cerditos



Fichero 3: Pocahontas



Fichero 4: Artículo de Medicina

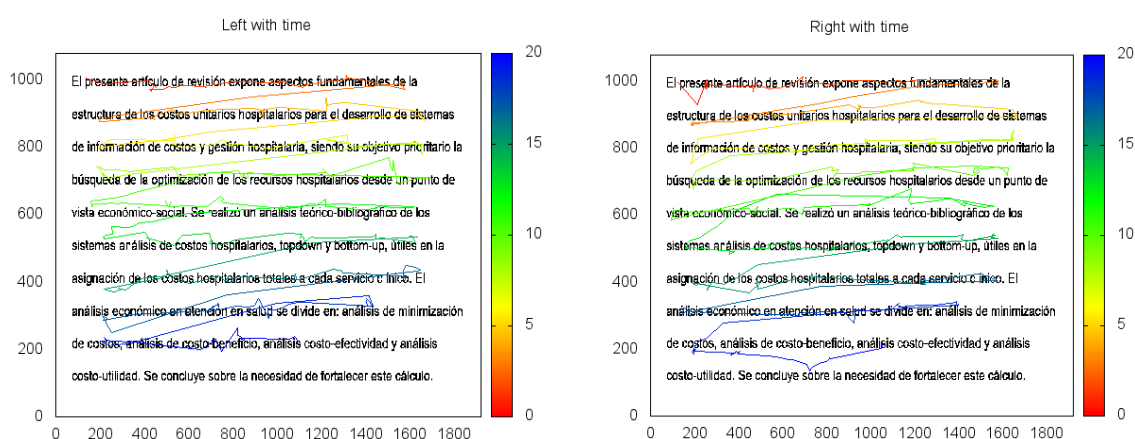


Ilustración 62: Usuario 5: Resultados del texto del fichero 4.

Fichero 5: Boletín Oficial del Estado

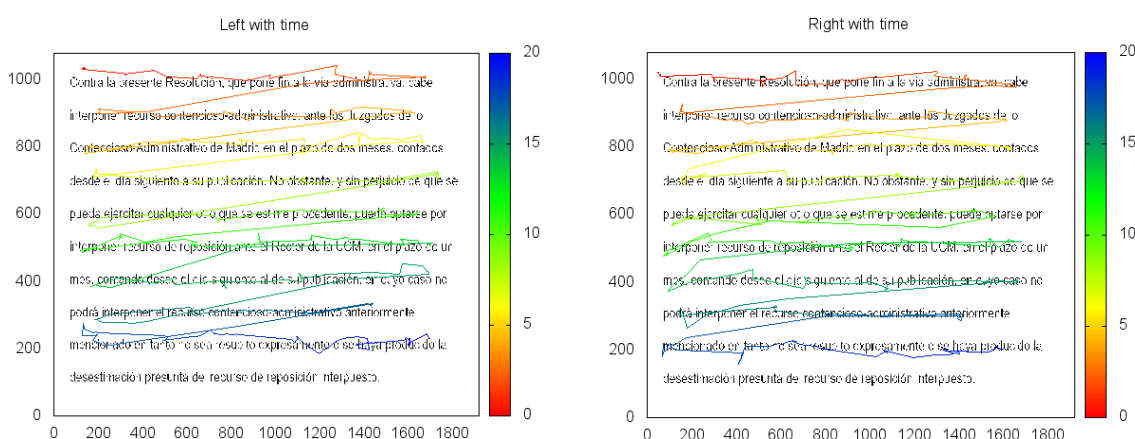


Ilustración 63: Usuario 5: Resultados del texto del fichero 5.

Fichero 6: Artículo del periódico

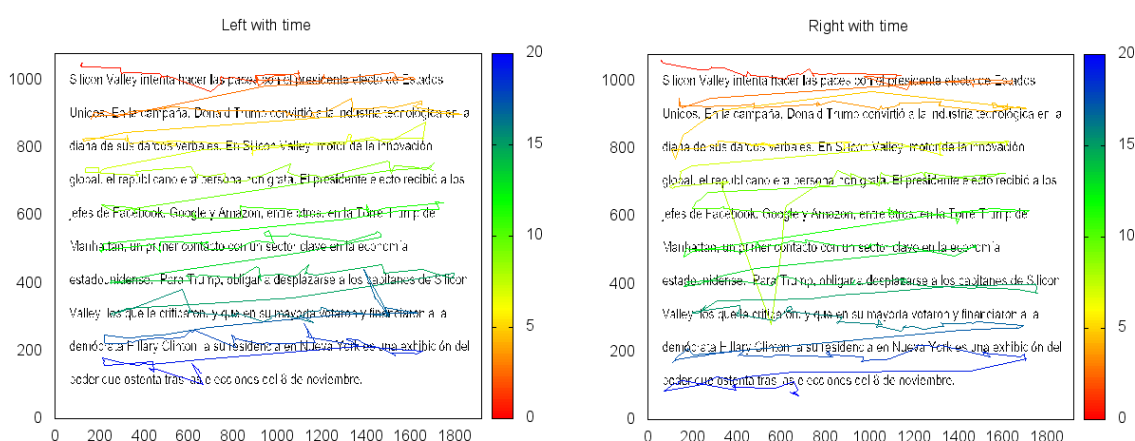


Ilustración 64: Usuario 5: Resultados del texto del fichero 6.

Comentarios

Por último, se comentan los resultados obtenidos por el usuario 5. Este usuario muestra uno de los patrones de lectura más lineales aunque, como ya ocurría para el resto de usuarios, los trazos de los patrones de lectura no están exactamente sobre la líneas del texto. Como se puede ver,

se siguen apreciando pequeños desplazamientos hacia arriba y hacia atrás en determinados instantes del trazo. Además, en las dos imágenes correspondientes al fichero 3 (ilustración 61) y la imagen del ojo derecho del fichero 6 (ilustración 64) se producen saltos mayores. A nivel general, y a diferencia de otros usuarios anteriormente comentados, el patrón de lectura si suele empezar al comienzo de la línea en la gran mayoría de los resultados.

Por otro lado, no se aprecian diferencias significativas en los patrones de lectura en base a la dificultad del texto. La longitud de los patrones de lectura llega al final del texto en casi todos los resultados presentados independientemente de su dificultad.

6.2. Análisis cuantitativo preliminar

El último de los objetivos del procedimiento evaluación (véase apartado 5.1) era la realización de un análisis cuantitativo preliminar de los resultados obtenidos del registro de patrones de lectura de los distintos usuarios. Para cumplir con este objetivo de la evaluación se han realizado tres procedimientos cuyos principales detalles y resultados se comentan en los siguientes apartados.

6.2.1. Líneas del texto vs líneas leídas por el usuario

Para determinar el número de líneas leídas por el usuario, se ha tenido en cuenta el número de trazos del patrón de lectura y solamente se han contabilizado las líneas completas que se han leído, es decir, no se han tenido en cuenta los trazos finales interrumpidos del patrón de lectura registrado.

En la siguiente tabla se muestra el número de líneas de los distintos textos en comparación con el número de línea completas leídas por el usuario. Se señala en color verde las lecturas completas del texto, es decir, cuando el número de líneas del texto y el número de líneas leídas por el usuario coincide. Se marca en color rojo, las diferencias de más 3 líneas entre el número total de líneas de texto y el número de líneas leídas por el usuario.

	Texto 1: Caperucita Roja	Texto 2: Los tres cerditos	Texto 3: Pocahontas	Texto 4: Artículo de Medicina	Texto 5: BOE	Texto 6: Artículo del periódico
Líneas totales	10	9	10	10	10	10
Usuario 1 Left/Right	9	9	8	9	8	8
Usuario 2 Left/Right	8	9	--	9	9	9
Usuario 3 Left/Right	8	7	6	6	6	7
Usuario 4 Left/Right	6	5	4	5	4	4
Usuario 5 Left/Right	8	9	9	8	9	9

Tabla 6: Resultados obtenidos de líneas de texto vs líneas leídas por el usuario.

A partir de los datos obtenidos en la tabla, se deduce que, a la mayoría de los usuarios participantes del procedimiento de evaluación no les ha dado tiempo a terminar la lectura de los textos completamente. Este hecho explica que el comportamiento final de los patrones de lectura resultantes sea más irregular al final en varios casos, debido a que el usuario aceleraba la velocidad de lectura para intentar completar la lectura del texto. Esta situación también fue comentada por la gran mayoría de los usuarios participantes en la evaluación. En este sentido y como se ve en la tabla, destaca el usuario 4 que, se ha quedado a varias líneas de completar la lectura de todos los textos, aunque, si volvemos a ver los resultados mostrados en el apartado anterior (apartado 6.1), este usuario obtiene uno de los patrones de lectura más claros. Por tanto, de los datos obtenidos se desprende que la velocidad de lectura influye en la calidad y estabilidad del patrón de lectura.

Por otro lado, el usuario 5 también obtiene esos buenos resultados en su patrón de lectura. Este usuario está cerca de completar la lectura del texto en casi todos los casos, incluso, llegándola a completar en el texto 2. Sin embargo, y como ya se comentó en el apartado 5.3, este usuario tiene un conocimiento previo de los textos, es decir, había leído los textos previamente al procedimiento de evaluación. Por lo tanto, la lectura previa de los textos antes de realizar el procedimiento de registro también influye en la calidad y estabilidad del patrón de lectura.

6.2.2. Desplazamientos hacia atrás

En este apartado se han contabilizado el número de desplazamientos hacia atrás en la evolución del patrón de lectura. Para determinar los instantes en los que se produce un desplazamiento hacia atrás se ha creado un programa que permite determinar el desplazamiento negativo en el patrón de lectura. Para ello, se tendrá en cuenta los valores de las coordenadas X de manera que, si el valor de la coordenada X en el instante $t+1$ es inferior al del instante t se considera que se ha producido un desplazamiento hacia atrás en la evolución de la lectura.

El número de desplazamientos hacia atrás obtenidos en los patrones de lectura de los usuarios en los distintos ficheros se muestran en la tabla inferior. Se han marcado en verde los casos en los que el número de desplazamientos hacia atrás ha quedado por debajo de 190 en ambos ojos. Los valores rojos corresponden a un número de desplazamientos por encima de 210.

	Texto 1: Caperucita Roja	Texto 2: Los tres cerditos	Texto 3: Pocahontas	Texto 4: Artículo de Medicina	Texto 5: BOE	Texto 6: Artículo del periódico
Usuario 1 Left/Right	231/250	200/207	220/215	203/225	191/215	201/222
Usuario 2 Left/Right	209/233	219/238	210/229	241/251	253/243	232/257
Usuario 3 Left/Right	161/176	184/185	195/186	184/192	186/183	205/187
Usuario 4 Left/Right	173/179	185/196	191/195	185/177	148/159	188/197
Usuario 5 Left/Right	188/201	202/215	227/220	169/194	197/174	205/217

Tabla 7: Cantidad de desplazamientos hacia atrás. Versión 1.

Como se ve en la tabla, a nivel general, la cantidad de desplazamientos hacia atrás es bastante elevada en comparación al número total de registros que se almacenan para cada patrón de

lectura. En este sentido, los usuarios con mayor cantidad de desplazamientos hacia atrás en su patrón de lectura son los usuarios 1 y 2, principalmente el usuario 2 ya que, en 5 de los 6 textos leídos tiene un número de desplazamientos mayor que el obtenido por los usuarios restantes. En cambio, los usuarios 3 y 4 destacan por tener un número menor de desplazamientos. Estos resultados también se pueden comprobar en las imágenes ya comentadas del apartado 6.1. donde la linealidad del patrón de lectura de los usuarios 3 y 4 era mayor que la obtenida por los usuarios 1 y 2.

No obstante, los valores de las coordenadas X pueden verse afectados por problemas de precisión en el registro del dispositivo. Además, es interesante conocer un número de desplazamientos hacia atrás de mayor tamaño, es decir, aquellos que son apreciados a simple vista en la representación de los resultados obtenidos por los usuarios. Por todos estos motivos, se ha realizado una nueva versión del programa que permite contabilizar el número de desplazamientos hacia atrás estableciendo un determinado umbral para la diferencia de los valores de la coordenada X en $x(t+1)$ y $x(t)$. La diferencia establecida ha sido de 5.0. En este caso, los resultados obtenidos son los mostrados en la tabla inferior (tabla 8). Se han señalado en verde los valores por debajo de 100 y en rojo, los valores por encima de 120.

	Texto 1: Caperucita Roja	Texto 2: Los tres cerditos	Texto 3: Pocahontas	Texto 4: Artículo de Medicina	Texto 5: BOE	Texto 6: Artículo del periódico
Usuario 1 Left/Right	124/149	106/131	144/148	117/147	115/152	128/150
Usuario 2 Left/Right	134/146	121/124	139/151	148/167	160/148	153/159
Usuario 3 Left/Right	76/90	103/93	91/88	81/81	107/108	106/108
Usuario 4 Left/Right	75/102	80/87	83/97	70/101	53/59	98/111
Usuario 5 Left/Right	102/108	98/105	132/119	102/100	82/82	111/130

Tabla 8: Cantidad de desplazamientos hacia atrás. Versión 2.

Como era de esperar, la cantidad de desplazamientos hacia atrás ha disminuido en relación al número de desplazamientos obtenidos por la versión anterior del programa. No obstante, estos resultados han sido mejor de lo esperado reduciendo en algunos casos hasta tres veces la cantidad de desplazamientos. Este hecho indica que se producen un gran número de pequeños desplazamientos hacia atrás en los patrones de lectura de los usuarios, aunque, estos pequeños saltos no son apreciados a simple vista.

De nuevo, los usuarios 3 y 4 son los que obtienen mejores resultados, es decir, tienen un número menor de desplazamientos hacia atrás de mayor tamaño en su patrón de lectura, a diferencia de los usuarios 1 y 2 que vuelve a ser los usuarios con más desplazamientos hacia atrás.

6.2.3. Desplazamientos hacia arriba

Este nuevo apartado es similar al apartado anteriormente comentado. En este caso, se han contabilizado el número de desplazamientos hacia arriba, por lo tanto, se han tenido en cuenta los valores de las coordenadas Y de los patrones de lectura de los usuarios. Así, se ha contabilizado un desplazamiento hacia arriba cuando el valor de la coordenada Y en el instante

$t+1$ es mayor que el valor de esta coordenada Y en el instante t . Por otro lado, al igual que en el apartado anterior, se han realizado dos versiones del programa para el cálculo de desplazamientos hacia arriba. En una primera versión, la diferencia entre los valores de las coordenadas en $y(t+1)$ e $y(t)$ ha sido estricta, versión ya comentada. En la segunda versión, se ha establecido un umbral de diferencia lo que permite contabilizar los desplazamientos hacia arriba de mayor tamaño. Al igual que en el apartado anterior, el umbral establecido ha sido de 5.0.

Los resultados obtenidos por la primera versión se muestran en la tabla inferior, tabla 9. En ella, se señalan en verde los casos en los que la cantidad de desplazamientos hacia arriba está por debajo de 260 y, en rojo, aquellos casos cuya cantidad de desplazamientos está por encima de 280.

	Texto 1: Caperucita Roja	Texto 2: Los tres cerditos	Texto 3: Pocahontas	Texto 4: Artículo de Medicina	Texto 5: BOE	Texto 6: Artículo del periódico
Usuario 1 Left/Right	261/272	230/234	248/254	241/243	247/251	256/245
Usuario 2 Left/Right	244/277	266/272	292/255	283/261	285/289	252/286
Usuario 3 Left/Right	265/255	271/276	285/292	287/293	241/249	265/266
Usuario 4 Left/Right	283/281	291/277	311/297	307/287	282/291	288/272
Usuario 5 Left/Right	234/269	304/294	267/294	284/286	285/285	269/280

Tabla 9: Cantidad de desplazamientos hacia arriba. Versión 1.

En esta primera versión y a nivel general, la cantidad de desplazamientos hacia arriba es mayor que la cantidad de desplazamientos hacia atrás (resultado del apartado anterior). En este caso, destaca que los usuarios con mayor número de desplazamientos hacia arriba (usuario 3, 4 y 5) corresponden a los usuarios con menor número de desplazamientos hacia atrás y que, en el análisis cualitativo, habían sido valorados como los patrones de lectura con mayor linealidad. Los resultados de esta tabla demuestran que el número de desplazamientos hacia arriba de estos usuarios es mayor que el obtenido por el usuario 1 que, a priori, parecía tener un patrón de lectura más irregular.

En la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos para la segunda versión. Se han marcado en verde los casos cuya cantidad de desplazamientos está por debajo de 90 y, en rojo, los valores por encima de 130.

	Texto 1: Caperucita Roja	Texto 2: Los tres cerditos	Texto 3: Pocahontas	Texto 4: Artículo de Medicina	Texto 5: BOE	Texto 6: Artículo del periódico
Usuario 1 Left/Right	143/146	124/153	146/138	151/173	131/164	157/159
Usuario 2 Left/Right	133/143	155/134	184/155	180/156	184/172	139/173
Usuario 3 Left/Right	75/78	89/61	73/89	71/85	70/88	88/114
Usuario 4 Left/Right	116/110	87/90	91/81	107/92	72/72	97/87
Usuario 5 Left/Right	66/76	79/85	123/124	99/90	85/84	100/107

Tabla 10: Cantidad de desplazamientos hacia arriba. Versión 2.

En esta tabla, y como ya ocurría en el apartado de desplazamientos hacia atrás, el número de desplazamientos hacia arriba es bastante inferior al número obtenido en la primera versión. Este hecho indica que se producen pequeños desplazamientos hacia arriba durante todo el registro del patrón de lectura, aunque, estos desplazamientos no sean apreciables a simple vista.

Por otro lado, los resultados vuelven a ser coherentes con lo comentado en el análisis cualitativo, es decir, los usuarios 3, 4 y 5 son los usuarios con patrones de lectura más lineales y con menor número de desplazamientos hacia arriba de mayor tamaño. De la diferencia de los resultados obtenidos entre la primera y la segunda versión se concluye que, aunque los usuarios 3, 4 y 5 tienen patrones de lectura con una mayor cantidad de desplazamientos hacia arriba (tabla 9), estos desplazamientos son pequeños. Este hecho hace que la linealidad del patrón de lectura de estos usuarios sea mejor a simple vista.

6.2.4. Comentarios adicionales del análisis cuantitativo preliminar

A parte de las conclusiones ya comentadas de este análisis cuantitativo preliminar, en otro sentido, es importante destacar que se podrían obtener y calcular otras posibles métricas para analizar y caracterizar el patrón de lectura del usuario, algunas de ellas, más complejas de calcular que las incluidas en este apartado. Para análisis más completos se podrían utilizar otras métricas más precisas como la cantidad de cambios de línea, la velocidad de lectura, número de repeticiones de cada palabra, etc. No obstante, las medidas seleccionadas para este análisis preliminar son suficientemente importantes para determinar la calidad de la lectura, es decir, si el usuario está leyendo bien o mal el texto mostrado.

7. Conclusiones

En este capítulo se comenta las conclusiones obtenidas de este trabajo. En primer lugar, se tratarán las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos por los distintos usuarios durante la etapa de evaluación y de los comentarios realizados por estos usuarios durante este procedimiento. Después, se explicarán las conclusiones más generales de la realización de este trabajo.

Como resultado de este trabajo, se ha desarrollado una aplicación para el registro de patrones de lectura de un usuario con un dispositivo de bajo coste. La evaluación de la aplicación tenía principalmente cuatro objetivos: comprobar la calidad de los resultados obtenidos en el registro de patrones, valorar si existían diferencias significativas en base a la dificultad del texto, analizar la posibilidad del uso de la aplicación para el diagnóstico de las patologías comentadas en esta memoria y realizar un análisis preliminar de los patrones de lectura obtenidos por un conjunto reducido de usuarios.

Para el primer objetivo y, tras realizar el procedimiento de evaluación, queda comprobada la calidad de los resultados de la aplicación. Los resultados mostrados en el apartado 6.1 permiten obtener conclusiones significativas sobre los patrones de lectura de los usuarios, principalmente, morfología del patrón de lectura y velocidad de lectura. Entre los principales aspectos de la morfología de los patrones de lectura destaca que los trazos resultantes no se sitúan exactamente sobre la línea de texto, posición que era de esperar. En varias ocasiones, esta línea se encuentra por encima o por debajo de la línea de lectura. No obstante, la posición del trazo es bastante razonable y permite realizar una asociación entre línea de lectura y línea del patrón de lectura. Los principales motivos de este hecho pueden ser varios, por ejemplo, un error de precisión del propio dispositivo en el registro de valores que hace que el registro no quede en la posición real en la que el usuario lo realiza, por falta de precisión en la calibración, o, debido a las características identificativas de la lectura del usuario. Otro aspecto característico de la morfología de los patrones de lectura es la existencia de ciclos y repeticiones que permiten identificar cuando el usuario tiene mayor dificultad en la lectura de una determinada palabra o expresión. Por otro lado, se recuerda que, además de los resultados mostrados, se han generado otros tipos de registros cuyo análisis directo o indirecto (tamaño de pupila, velocidad instantánea de la lectura, etc.) podrían ampliar los resultados obtenidos de los patrones de lectura en el procedimiento de evaluación.

Respecto a las diferencias de los patrones de lectura en base a la dificultad del texto, no se han observado diferencias significativas en ninguno de los usuarios. Por lo tanto, parece que no existe ninguna diferencia en los patrones de lectura de los usuarios debido a la dificultad del texto de lectura, al menos en las porciones de texto elegidas para las pruebas de validación. Sin embargo, durante la etapa de evaluación, algunos usuarios comentaron que durante la realización de las pruebas estaban más concentrados en leer el texto con precisión que en su contenido, es decir, no habían prestado demasiada atención al contenido del texto que estaban leyendo. Por lo tanto, puede ser que la diferencia entre la lectura de textos fáciles y difíciles radique en esta cuestión, es decir, en la comprensión posterior que el usuario ha tenido del texto y no tanto en el patrón de lectura en sí. Así, para demostrar esta hipótesis sería necesaria la incorporación de un test de preguntas sobre el contenido del texto para poder valorar la comprensión del usuario. De esta posible incorporación a la aplicación, se darán más detalles en el apartado 9 de Trabajo Futuro.

En relación al uso de la aplicación para la recomendación de diagnóstico de distintas patologías y teniendo en cuenta tanto los resultados obtenidos como los comentarios realizados en los párrafos anteriores, se cree que es posible el uso de la aplicación para tal fin. Los parámetros de la lectura resultantes de esta aplicación e incluso, las series temporales al completo podrían ser utilizadas para alimentar un clasificador que permitiera hacer esa recomendación. Para ello, y tratándose de un clasificador mediante aprendizaje supervisado sería necesario entrenar este algoritmo con los datos de seguimiento ocular de personas sin la patología y con la patología en cuestión. Además, las pruebas de evaluación del sistema se tendrían que realizar con más usuarios para comprobar la validez de la aplicación para este objetivo. Por otro lado, para que esta aplicación pudiera ser utilizada en el ámbito médico tendría que estar avalada por los profesionales médicos correspondientes. También, sería necesario que los textos utilizados tuvieran características capaces de potenciar el diagnóstico, textos que actualmente ya utilizan estos profesionales, por ejemplo, para el diagnóstico de la dislexia.

Respecto al análisis cuantitativo preliminar de los resultados obtenidos, los objetivos principales de la realización de este trabajo no pasan por cuantificar ni clasificar los datos obtenidos en detalle, sino por validar la recogida de datos de seguimiento ocular con un dispositivo de bajo coste y, el posterior uso de estos datos para la clasificación y la recomendación de diagnóstico de distintas patologías. No obstante, del análisis realizado se concluye que la mayoría de los usuarios no han podido completar la lectura del texto por falta de tiempo y que la calidad y estabilidad del patrón de lectura se ve afectada por la velocidad de lectura de los usuarios y por la lectura previa del texto. Además, se ha comprobado que existe una gran cantidad de pequeños desplazamientos hacia arriba y hacia atrás a lo largo de todos los patrones de lectura registrados y que la cantidad de desplazamientos hacia arriba es mayor que la cantidad de desplazamientos hacia atrás.

Además de los comentarios relacionados con los objetivos de la evaluación, los usuarios también han valorado positivamente la interfaz de la aplicación desarrollada tanto su aspecto como la cantidad de información mostrada. Este último detalle está relacionado con el hecho de que, los usuarios estaban interesados en conocer cómo se realiza el registro del patrón de lectura. Por lo tanto, la decisión de incorporar información adicional sobre el procedimiento de registro ha sido acertada. No obstante, esto se debe posiblemente a que 4 de los 5 usuarios que han realizado las pruebas de evaluación son ingenieros por lo que, normalmente, suelen tener curiosidad e interés en conocer los procedimientos que van a realizar. Por otro lado, los usuarios también comentaron que la realización de tantas pruebas consecutivas podría ser un poco aburrido y tedioso. La solución a este problema pasa por reducir el número de pruebas o ampliar los tiempos de descanso.

A nivel más general, las principales conclusiones obtenidas de la realización de este trabajo son las siguientes. En primer lugar, uno de aspectos que más valor le dan a este trabajo es la decisión de utilizar un dispositivo de seguimiento ocular de bajo coste. Como ya se comentó, la elección de este dispositivo se debía al deseo llegar al mayor número de personas posible de manera que el precio del dispositivo no fuera un problema para su uso. En este sentido, el dispositivo seleccionado es de los más baratos del mercado, pero sus características y precisión, no tiene nada que envidiar a otros dispositivos de coste superior.

En segundo lugar, es importante destacar las características ya incorporadas a la aplicación para su posterior uso médico, entre ellas, la información incluida en el formulario del usuario, la creación de un número identificativo propio de cada usuario, las diferentes carpetas de resultados organizadas por usuarios, etc. Es cierto que faltaría modificar y volver a pensar

algunos detalles para que esta aplicación pudiera ser utilizada como una prueba médica, pero la base está incluida.

Finalmente, a nivel de diseño y desarrollo de la aplicación, la elección de Visual Studio 2015 y Qt Creator ha sido acertada. La configuración de Visual Studio 2015 para trabajar con la SDK del dispositivo ha llevado bastante tiempo y esfuerzo, pero al final, su elección ha resultado óptima para el desarrollo del trabajo. Por este motivo, en esta memoria, se ha incorporado el procedimiento de configuración, con el objetivo de facilitar este procedimiento en trabajos posteriores. Respecto al uso de QT Creator, este IDE es totalmente recomendable, ya que, en relativamente poco tiempo de aprendizaje se consigue ver buenos resultados.

8. Retos superados relacionados con el uso de dispositivos de bajo coste

Tras comentar las conclusiones obtenidas del trabajo realizado, se pasa a tratar las principales dificultades encontradas durante el desarrollo del mismo. Normalmente, este apartado se suele comenzar señalando como principal dificultad el aprendizaje del uso del nuevo dispositivo, en este caso, del rastreador ocular The Eye Tribe Tracker. Sin embargo, una de las ventajas de este dispositivo es que es bastante sencillo de utilizar. Además, la información proporcionada en su página web sobre la puesta en marcha y uso del dispositivo a nivel usuario es buena. No obstante, la información a nivel desarrollador no está lo suficientemente clara. Para poder trabajar con el dispositivo en los distintos lenguajes de programación es necesario descargar, instalar y configurar la SDK del mismo. En este sentido, se dan pocas indicaciones haciendo que este procedimiento sea difícil de realizar. Por otro lado, también se ha echado en falta algunos detalles más sobre la información que proporciona, por ejemplo, la especificación de los filtros que utiliza para obtener los distintos tipos de coordenadas de la mirada. Otra dificultad añadida y a la vez, un valor de calidad de este trabajo es que, a día de hoy, no existe código libre en internet que trabaje con este dispositivo. En la actualidad, solo existe un ejemplo en la propia página web del dispositivo y algunas porciones de código en su foro. En este sentido, sería de gran utilidad una documentación más completa y con una mayor cantidad de ejemplos para poder trabajar y orientar el código realizado en base a esos criterios.

Una de las principales dificultades de este trabajo durante el desarrollo y evaluación, ha sido el gran número de variables a tener en cuenta. Estas variables se pueden dividir en cuatro grandes grupos, relativas al usuario, al dispositivo, a los textos de lectura y a las pruebas de evaluación. En el primer grupo, se incluiría las características relativas a las condiciones de los usuarios como la edad, la calidad de su visión y la capacidad de lectura. En las relacionadas con el dispositivo estarían las condiciones de luz, su posición o el ángulo en el que está situado. No obstante, estas características se pueden controlar con el procedimiento de calibración que ayuda a verificar que el dispositivo está registrando los datos correctamente. Los detalles de los textos de lectura son los más numerosos y, por tanto, los que más variables tienen por decidir, entre ellas, el tamaño y tipo de letra, el color de la letra y del fondo, el interlineado, etc. Por último, en las características relativas a las pruebas de evaluación estarían todas aquellas que influyen, en mayor o menor medida en las pruebas y que no están recogidas en los grupos anteriores, por ejemplo, el lugar donde se realicen esas pruebas, la hora de las mismas o los objetivos que se planteen. Por todo ello, una de las principales dificultades de este trabajo ha sido el intentar definir o concretar todos estos aspectos. No obstante, el cambio de algunos de ellos, principalmente aquellos relacionados con las características del texto y su influencia en los patrones de lectura serían muy interesantes de analizar en futuros trabajos.

Por último, una de las dificultades más destacadas ha sido el deseo de realizar una aplicación de uso médico que pudiera servir para realizar la recomendación del diagnóstico de distintas patologías. El desarrollo de aplicaciones en este ámbito tiene muchos factores que controlar y también, las pruebas de evaluación deben de ser mucho más exhaustivas que las realizadas para la evaluación de esta aplicación. Además, deben de realizarse con una cantidad de usuarios mucho mayor y con diferentes perfiles, es decir, usuarios que tenga y no tenga la patología a analizar para poder verificar que la aplicación cumple verdaderamente con el propósito planteado.

9. Trabajo futuro

Como se ha comentado a lo largo de esta memoria, existen multitud de adaptaciones, optimizaciones, posibles mejoras y trabajos futuros relacionados con la aplicación resultante en este trabajo. Para facilitar los comentarios y explicación de estos posibles cambios y mejoras, se comenzará con los principales aspectos a incorporar o pruebas adicionales a realizar sobre la aplicación resultante. A continuación, se explicarán los detalles más importantes que se deberían de modificar para que la aplicación pudiera ser utilizada en la recomendación de diagnóstico de distintas patologías.

Los principales cambios y pruebas adicionales en la aplicación actual son los siguientes:

- En primer lugar, se podría incorporar un test de comprensión de la lectura realizada por el usuario. Para ello, existen dos posibilidades: limitar el número de textos que se pueden seleccionar y así, crear un test de comprensión específico para cada uno de ellos o, como segunda opción, incluir un test general que se pudiera utilizar para todos los posibles textos que el usuario deseara incorporar. Esta última opción es la que se considera más adecuada teniendo en cuenta la situación actual de la aplicación. Por otro lado, además de la propia incorporación del test de comprensión y para que verdaderamente fuera útil, sería necesaria la revisión de las respuestas dadas por el usuario para verificar que la comprensión del texto leído ha sido la correcta.
- Otro aspecto posible a incorporar y realizar actualmente sería el de generar mayor cantidad de resultados con la información proporcionada por el dispositivo ya que, como ya se comentó en el apartado 4.2, el dispositivo proporciona más información de la que actualmente se está utilizando para la generación de resultados. Por lo tanto, se podría generar nuevos resultados utilizando combinaciones de los ya existentes o usando otra información diferente.
- Respecto al procedimiento de evaluación de la aplicación, éste podría ampliar sus objetivos valorando y analizando distintas características en los textos y su influencia en los patrones de lectura obtenidos. Un posible ejemplo podría ser analizar la influencia de la disposición del texto, del color de fondo de la imagen o del color de la letra sobre el patrón de lectura del usuario. Para que esto fuera posible, sería necesario un procedimiento de evaluación más exhaustivo, con más usuarios y distintos perfiles que permitiera obtener resultados de calidad.
- Un cambio de gran utilidad para el futuro uso de la aplicación sería que ésta pudiera adaptarse a distintos tamaños de pantallas, lo que supondría ampliar su uso a distintos dispositivos, principalmente, móviles y tablets. Este cambio no parece suponer una gran dificultad respecto a la aplicación ya que bastaría con incorporar esta adaptación de tamaño en el código de la aplicación. Sin embargo, este cambio involucra al dispositivo de seguimiento ocular utilizado ya que, el rastreador ocular actual no es compatible para el uso en móviles y tablets, principalmente, por su tamaño. Por lo tanto, en este sentido habría que trabajar con otro rastreador ocular y adaptar la aplicación a las características de este nuevo dispositivo.
- Por último, la aplicación podría incorporar también una librería de algoritmos de aprendizaje automático para abordar la clasificación de los patrones de lectura utilizando distintas métricas. En particular, métodos desarrollados específicamente para las series temporales multivariadas que puedan aplicarse en la caracterización del seguimiento ocular (Rozado et al., 2010, 2011, 2012a, 2012b, 2012c, 2015).

A continuación, se comentan los cambios más relevantes y necesarios con el fin de orientar la aplicación para la recomendación de diagnóstico de distintas patologías.

- Una de las primeras mejoras que se podrían incorporar a la aplicación desarrollada sería el uso de textos que potenciaran determinados rasgos distintivos de usuarios con esa patología. Para ello, sería necesario tener la opinión y el respaldo de los profesionales médicos dedicados al diagnóstico de la patología a valorar. Una vez creados estos textos “especiales” para el diagnóstico, sería conveniente incluir un test de comprensión posterior a la lectura. En este caso, y ya que los textos estarán definidos previamente, el test de comprensión podría ser específico para cada texto. En este punto, es importante recordar que, en el caso de la dislexia, el diagnóstico se hace cuando son niños (edades entre 7 – 9 años). Por lo tanto, habría que adaptar los textos y los test de comprensión a la edad de estos usuarios. Además, sería necesaria la revisión y evaluación final de los textos y test de comprensión por los profesionales correspondientes.
- Por otro lado, para un uso médico de la aplicación sería necesario revisar y, posiblemente, reducir la información mostrada en la aplicación. Normalmente, en el ámbito médico se desea que las pruebas de diagnóstico sean lo más rápidas posibles para los usuarios proporcionando la mayor cantidad posible de información del paciente en ese tiempo.
- En relación con este último punto y como ya se comentó en las mejoras propias de la aplicación en su situación actual, ampliar el uso de la aplicación a dispositivos con distintos tamaños de pantalla sería de gran utilidad ya que se podrían realizar estas pruebas en otros ámbitos que posiblemente sean más cómodos para los pacientes.
- Por último, el aspecto fundamental que se debería de incorporar en la aplicación para que fuera un verdadero sistema de recomendación de diagnóstico de patologías sería un clasificador específico y de calidad que permitiera realizar y orientar al profesional médico en el diagnóstico de esa patología. Para ello, se podría utilizar algunos de los parámetros del seguimiento ocular recogidos por la aplicación, e incluso, utilizar las series temporales al completo, para entrenar un clasificador de aprendizaje supervisado que permitiera realizar la clasificación de los usuarios en base a la patología analizada. Además, para entrenar y validar el clasificador sería necesario un mayor número de usuarios con ambos perfiles, es decir, usuarios que presentaran y no presentaran la patología en cuestión. Posiblemente, la incorporación de este clasificador ayudaría a que la aplicación tuviera más importancia en el ámbito en el que se desea implantar, aunque, el entrenamiento y validación de este clasificador haría que el desarrollo y puesta en marcha de la aplicación final llevara bastante más tiempo.

10. Anexos

Anexo 1: Guía de instalación y configuración inicial del dispositivo.

En este apartado se incluye la siguiente información:

- Conexión del dispositivo y posición del usuario.
- EyeTribe SDK: EyeTribe Server y EyeTribe UI.
- Procedimiento de calibración del dispositivo.

1. Conexión del dispositivo y posición del usuario.

Para un correcto funcionamiento del dispositivo es necesario seguir los siguientes pasos:

Paso 1: Conectar el dispositivo al ordenador.

Enroskar el trípode al dispositivo asegurándose que el rastreador permanece fijo y conectar el dispositivo mediante el cable USB 3.0 al ordenador. En este punto, es importante asegurarse que los drivers de este puerto están ya instalados, en caso contrario, el dispositivo no funcionará.

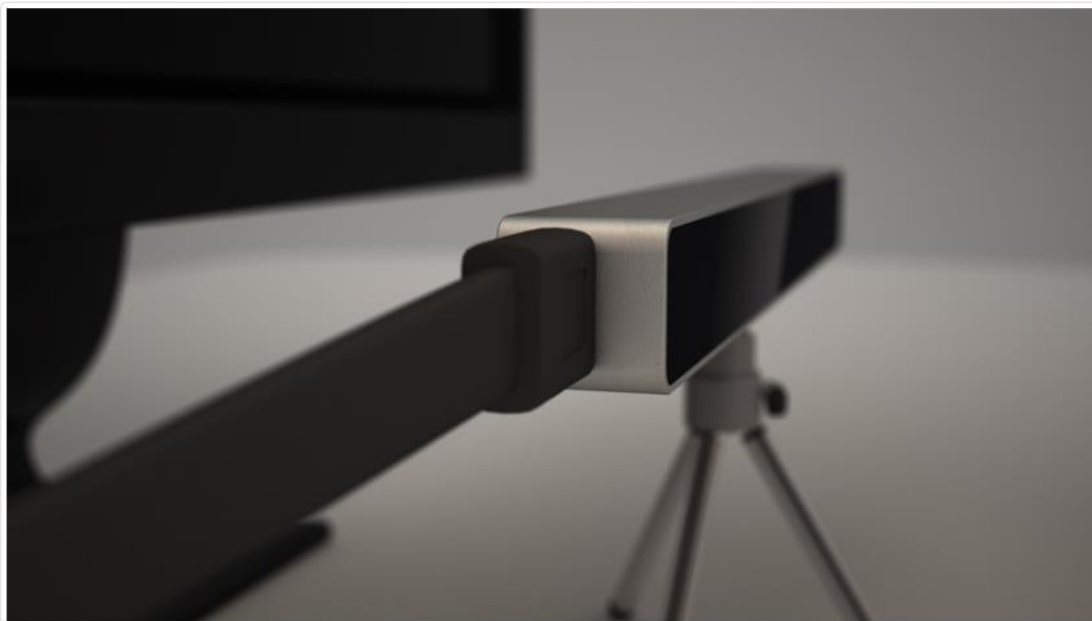


Ilustración 65: Anexo 1: Conectar el dispositivo al ordenador.

Paso 2: Situar el rastreador ocular en la posición correcta.

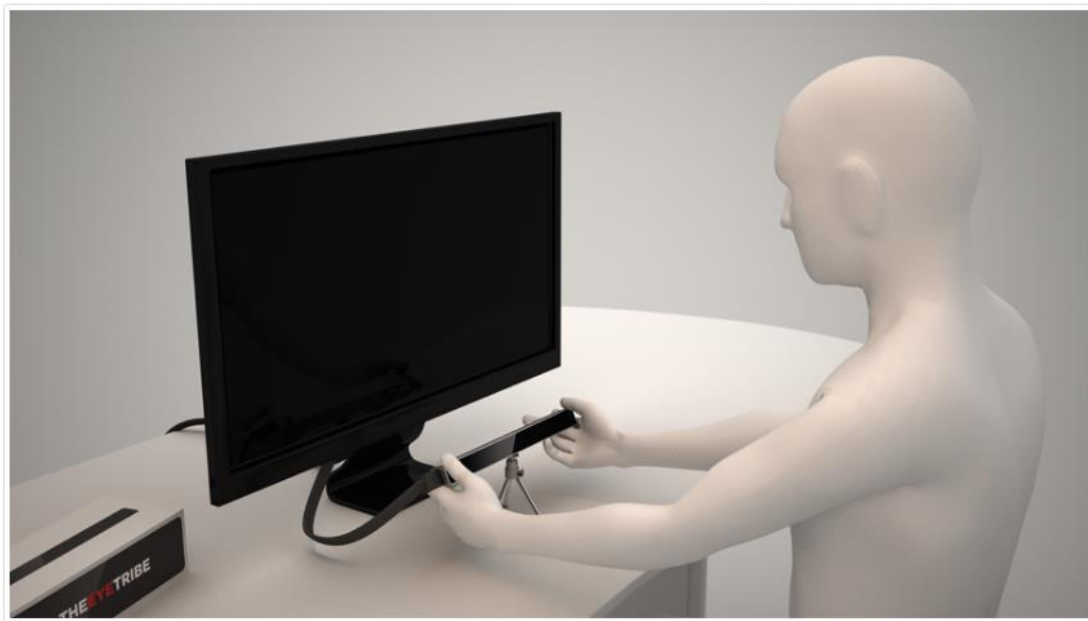


Ilustración 66: Anexo 1: Situar el rastreador ocular en la posición correcta.

El dispositivo debe estar sobre una superficie plana horizontal debajo del monitor del ordenador. Es importante que este centrado respecto a la pantalla. Para este dispositivo, el tamaño máximo de la pantalla es de 24”.

Por otro lado, también se puede utilizar el rastreador en un ordenador portátil. Para ello, no será necesario utilizar el trípode, pero sí, algún mecanismo o sistema adicional para elevar el rastreador y situarlo en la posición y el ángulo correcto.

En ambos casos, utilizando el trípode o solo el dispositivo, es importante que el rastreador se coloque de manera que no se mueva durante el funcionamiento, ya que esto hará que los resultados del seguimiento no sean correctos.

Paso 3: Instalar el Tracker SW y Tracker UI.

Descargar e instalar el servidor del rastreador (Tracker SW) y la interfaz de usuario del rastreador (Tracker UI). Para ello, es necesario acceder a su página web utilizando un usuario registrado. Durante el funcionamiento del rastreador ambos programas deben permanecer abiertos.

Paso 4: Situación del usuario.

El usuario debe situarse en frente del monitor, a una distancia de 45 a 75 cm. El dispositivo debe apuntar a su cara, por lo tanto, es necesario elevar el rastreado con el ángulo correcto. Para asegurarse, se puede utilizar la interfaz de usuario que proporciona el dispositivo y que se comentará con mayor detalle en el siguiente apartado. Para que el procedimiento sea correcto, deben aparecer los dos ojos abiertos en un fondo color verde intenso. A continuación, se debe realizar el procedimiento de calibración que aparece en la misma interfaz de usuario. Es importante no mover la cabeza durante la calibración. Tras finalizar este procedimiento, obtendrá una valoración entre 1 y 5 estrellas. Cuanto mayor sea este valor, mayor será la precisión del seguimiento de la mirada.



Ilustración 67: Anexo 1: Situación del usuario.

2. EyeTribe SDK: EyeTribe Server y EyeTribe UI.

Una vez descargado el SDK del dispositivo, se instalará el servidor y la interfaz de usuario del EyeTribe. En este apartado, se explicarán los principales aspectos de la configuración y uso de la interfaz de usuario en Windows (sistema operativo utilizado en este trabajo).

Interfaz de usuario de EyeTribe

La aplicación de la interfaz de usuario del rastreador se inicia desde un icono en el escritorio, al igual que el servidor del dispositivo. El software se instala por defecto en *C:\Archivos de programa (x86)\EyeTribe*. Antes de iniciar la aplicación de la interfaz de usuario es necesario iniciar el servidor del dispositivo. Los iconos de ambas aplicaciones son los que se muestra a continuación.



Ilustración 68: Anexo 1: Iconos de la interfaz de usuario (izquierda) y del servidor (derecha).

Una vez iniciada la aplicación de la interfaz de usuario aparecerá la ventana principal que se muestra en la ilustración inferior. Como se ve, esta UI proporciona retroalimentación directa del estado del rastreador y permite cambiar la configuración predeterminada de algunas de sus características, ayudando a adaptarse a las necesidades del usuario en cada momento. Todos los cambios realizados se guardan automáticamente al cerrar la aplicación y se volverán a cargar al reiniciarla.

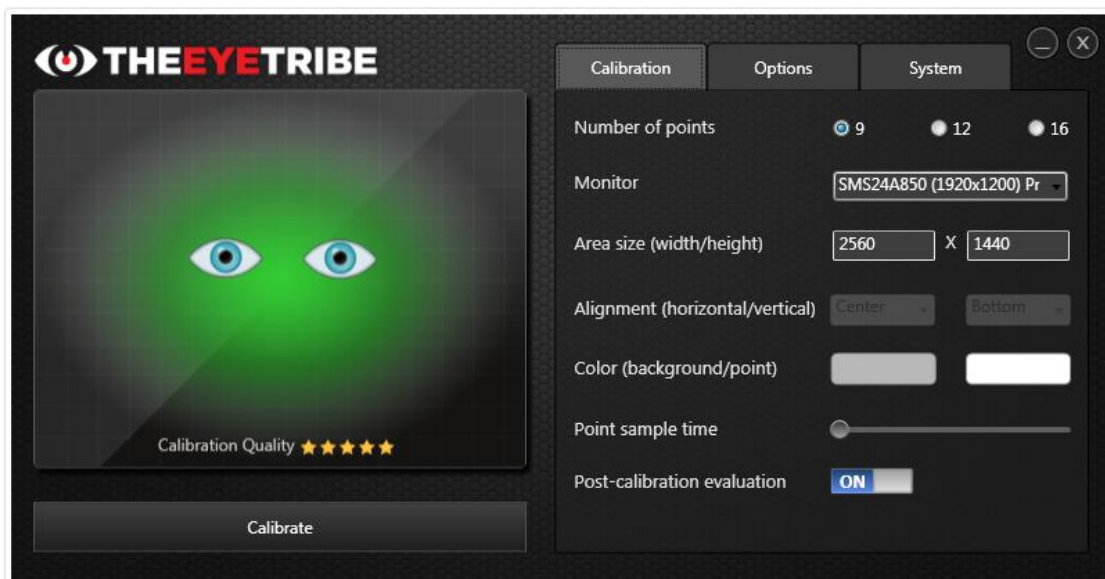


Ilustración 69: Anexo 1: Ventana principal de la interfaz de usuario.

Demo del uso del dispositivo.

Lo primero que aparece al iniciar la interfaz de usuario del dispositivo es una demostración de cómo situar y configurar el mismo (similar al apartado anterior). La aparición de esta “demo” se puede desactivar seleccionando está opción en la parte inferior de la demo, lo que hará que no aparezca por defecto. No obstante, el usuario puede iniciarla en cualquier momento pulsando en “Start in Demo Mode” en la pestaña “Options” de la interfaz de usuario.

Trackbox

En la parte izquierda de ventana principal de la interfaz de usuario, se muestra la ventana del “Trackbox”. El “trackbox” del rastreador es el volumen en el espacio donde el rastreador puede registrar la mirada del usuario. Esta ventana es una representación gráfica de la posición relativa del usuario respecto al dispositivo, por lo tanto, sirve como guía para determinar si el usuario se encuentra dentro de esta zona.

Por otro lado, todos los movimientos de los ojos que pueden ser registrados por el dispositivo se reflejan en esta ventana. Para ello, se mostrarán cero, uno o dos ojos dependiendo de la calidad del seguimiento. Si la calidad del seguimiento es aceptable, ambos ojos aparecerán dentro del “trackbox” reflejando los movimientos físicos del usuario en tiempo real. Además, se utilizan cambios en el color de fondo para indicar la calidad del seguimiento.

Algunos ejemplos de posibles salidas de la ventana del “trackbox” se muestran a continuación.



Ilustración 70: Anexo 1: Ejemplos de la ventana de Trackbox.

Para cada uno de los casos anteriores:

- Si se muestra una imagen de fondo verde intenso con dos ojos en el centro, el seguimiento es bueno.
- Si se trata del segundo caso, seguimiento limitado, el usuario o el dispositivo no están en la posición correcta.
- Si aparece la tercera imagen, seguimiento nulo, el sistema funciona, pero el rastreador no es capaz de encontrar los ojos.
- En el último caso, se muestra un mensaje de error. Los mensajes de error también se utilizan para comunicar diferentes aspectos de la calidad del seguimiento, por ejemplo, en la imagen superior aparece una advertencia sobre la falta de conectividad del rastreador.

Para obtener un seguimiento de la mirada óptimo, es necesario mantener la posición de los ojos en el centro del “trackbox”.

Mensajes de error

La ventana del “trackbox” también se puede utilizar para mostrar mensajes de error o advertencias al usuario. Algunos de los mensajes más habituales que pueden aparecer y sus principales causas se muestran en la tabla inferior.

Mensaje de error	Descripción
“Device not connected”	El rastreador no se detecta. Vuelva a conectar el rastreador.
“Device connected to a USB2.0 port”	El dispositivo no se detecta debido a que se está utilizando un host USB no compatible. Para solucionarlo, descargar e instalar los controladores compatibles para su fabricante de USB 3.0
“A firmware updated is required”	El rastreador se detecta, pero no funciona correctamente a causa de un firmware equivocado.
“No data coming out of the sensor”	El dispositivo se detecta, pero no puede recibir los datos.

Tabla 11: Anexo 1: Mensajes de error.

Pestañas de la interfaz de usuario: Calibración y opciones.

La interfaz de usuario dispone de dos pestañas más, la pestaña de calibración y la pestaña de opciones. En este apartado, se hablará de la pestaña de opciones dejando para la siguiente sección todo lo referente a la calibración y la configuración de este procedimiento.

Desde esta pestaña se pueden controlar las opciones que se muestran en la tabla

	Descripción
“API Console”	Permite ver y grabar los datos recibidos por el servidor del rastreador.
“Online API help”	Redirecciona a la documentación de ayuda del dispositivo
“Start in Demo Mode”	Permite activar y desactivar la demo del dispositivo.
“Mouse Gaze Redirect”	Una vez realizada la calibración del dispositivo, esta opción permite controlar el cursor del ratón con el dispositivo.
“Mouse Stabilization”	Permite suavizar la señal de la mirada para reducir las fluctuaciones, mejorando así, el control del cursor del ratón.

Tabla 12: Anexo 1: Pestaña de opciones.

3. Calibración del dispositivo

En la parte inferior de la ventana principal del dispositivo, justo debajo de la ventana del “trackbox”, se encuentra el botón de calibración. Al pulsarlo, se realizará el procedimiento de calibración propio del dispositivo. Para llevar a cabo este procedimiento, el usuario deberá mirar a una serie de objetivos circulares mostrados en la pantalla del ordenador. Cada uno de estos objetivos aparecerán uno por uno y serán visibles durante un determinado tiempo. En total, el procedimiento de calibración suele tardar alrededor de unos 20 segundos aproximadamente. No obstante, la ventana de calibración puede interrumpirse presionando *Escape* o haciendo doble clic en el área de calibración.

Ventana de evaluación

La ventana de evaluación (imagen inferior) se presenta justo después de completar el procedimiento de calibración. En ella, se muestra una indicación de la calidad de la calibración para lo cual, se presentan una serie de puntos que reaccionan cuando el usuario está mirándolos.

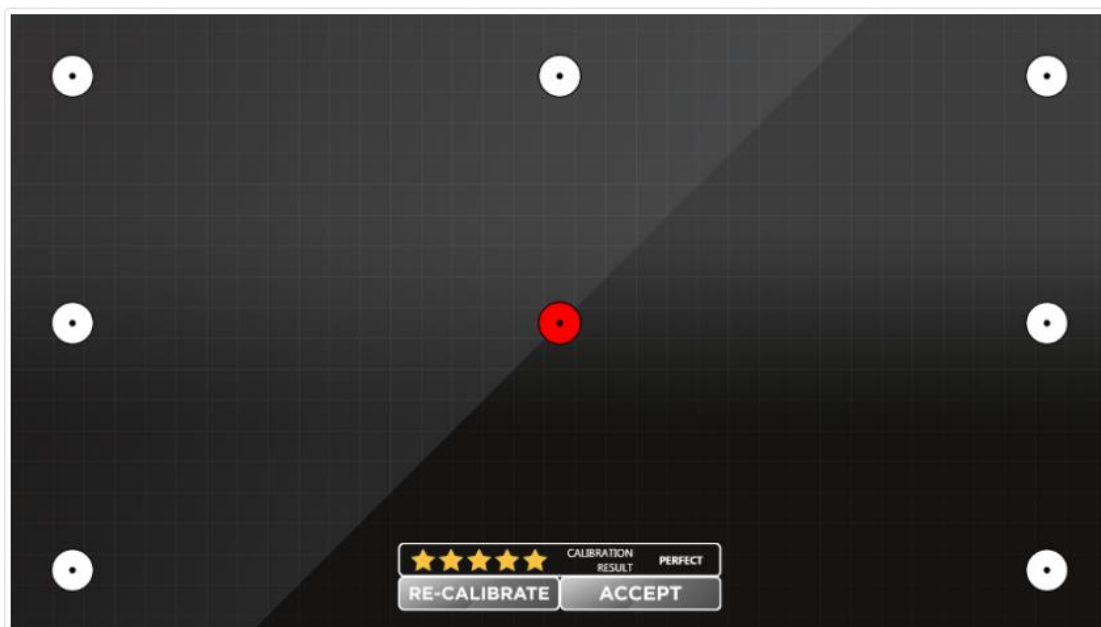


Ilustración 71: Anexo 1: Calidad de la calibración.

En la parte inferior de la pantalla, se da la opción de recalibrar o aceptar la calibración realizada. Por otro lado, el control de clasificación proporciona una medida cuantificable de la exactitud actual de la calibración. Para ello, se utiliza una clasificación basada en estrellas y un comentario adicional a su derecha. Las posibles clasificaciones y mensajes se muestran en la siguiente tabla.

Rango	Mensaje	Descripción
	"Perfect"	Calibración óptima (<0.5°)
	"Good"	Adecuado para el seguimiento ocular (<0.7°)
	"Moderate"	Aceptable, pero, se debería intentar mejorar (< 1 °)
	"Poor"	No es aceptable, se debe intentar mejor (< 1.5 °)
	"Re-calibrate"	La calibración actual no es buena. Es necesario recalibrar.
	"Un-calibrated"	No se ha calibrado.

Tabla 13: Anexo 1: Clasificación y mensajes de calibración.

Pestaña de calibración

En la interfaz de usuario, existe una pestaña de calibración donde el usuario puede cambiar la configuración de algunas de las opciones del procedimiento de calibración. Algunas de las propiedades que se pueden modificar aparecen en la siguiente tabla:

	Descripción
"Number of Points"	Se utiliza para indicar el número de puntos utilizados como objetivos en el procedimiento de calibración. Se puede elegir entre 9, 12 y 16. El número por defecto es 9.
"Monitor Selection"	Permite seleccionar el monitor en el que se ha colocado el EyeTribe. Los monitores detectados aparecerán con su nombre y resolución máxima
"Area size (width/height)"	Ancho y altura del monitor seleccionador en píxeles. Con estos valores se puede especificar un ancho o una altura más inferiores seleccionando así un área de calibración reducida.
"Alignment (horizontal/vertical)"	Permite colocar el área de calibración reducida horizontal y verticalmente. En alineación horizontal se puede elegir entre izquierda, centro y derecha. En alineación vertical, se selecciona entre superior, centro e inferior.
"Color (background/point)"	Se permite cambiar el color de fondo de la pantalla y el color de los objetivos circulares.
"Point sample time"	Se puede cambiar el tiempo de visualización de cada los objetivos durante el procedimiento de calibración. Se puede elegir un tiempo de visualización entre 500 ms (medio segundo) hasta 2000 ms (dos segundos).

Tabla 14: Anexo 1: Pestaña de calibración.

Anexo 2: Código del programa de registro de patrones

```
1  // RegistroPatronLectura.cpp: define el punto de entrada de la aplicación de consola.
2  //
3
4  #include <iostream>
5  #include <string>
6  #include <stdlib.h>
7  #include <stdio.h>
8  #include <time.h>
9  #include <fstream>
10 #include <experimental\filesystem>
11 #include "gazeapi.h"
12
13 using namespace std;
14
15 int State;
16 bool Is_fix;
17 float LeftEyeX, LeftEyeY, LeftEye_pSize, LeftEye_pCenterX, LeftEye_pCenterY;
18 float RightEyeX, RightEyeY, RightEye_pSize, RightEye_pCenterX, RightEye_pCenterY;
19
20 // --- MyGaze definition
21 class MyGaze : public gtl::IGazeListener{
22 public:
23     MyGaze();
24     ~MyGaze();
25 private:
26     // I gaze listener
27     void on_gaze_data(gtl::GazeData const & gaze_data);
28 private:
29     gtl::GazeApi m_api;
30 };
31
32 // --- MyGaze implementation
33 MyGaze::MyGaze(){
34     // Connect to the server in push mode on the default TCP port (6555)
35     if (m_api.connect(6555))
36     {
37         cout << "CONECTANDO ..." << endl;
38         // Enable GazeData notifications
39         m_api.add_listener(*this);
40     }
41 }
42
43
44 MyGaze::~MyGaze(){
45     m_api.remove_listener(*this);
46     m_api.disconnect();
47 }
48
49 void MyGaze::on_gaze_data(gtl::GazeData const & gaze_data){
50     if (gaze_data.state & gtl::GazeData::GD_STATE_TRACKING_GAZE){
51         // Is fix
52         Is_fix = gaze_data.fix;
53
54         // State -> 32bit masked state integer
55         State = gaze_data.state;
56
57         // Eyes
58         gtl::Point2D const & smoothedCoordinatesLeftEye = gaze_data.lefteye.avg; // smoothed data from left eye
59         gtl::Point2D const & smoothedCoordinatesRightEye = gaze_data.righteye.avg; // smoothed data from right eye
60
61         // Left
62         LeftEyeX = smoothedCoordinatesLeftEye.x;
63         LeftEyeY = smoothedCoordinatesLeftEye.y;
64         LeftEye_pSize = gaze_data.lefteye.psize;
65         LeftEye_pCenterX = gaze_data.lefteye.pcenter.x;
66         LeftEye_pCenterY = gaze_data.lefteye.pcenter.y;
67
68         // Right
69         RightEyeX = smoothedCoordinatesRightEye.x;
70         RightEyeY = smoothedCoordinatesRightEye.y;
71         RightEye_pSize = gaze_data.righteye.psize;
72         RightEye_pCenterX = gaze_data.righteye.pcenter.x;
73         RightEye_pCenterY = gaze_data.righteye.pcenter.y;
74     }
75 }
76
77
78
79
80 /*
81 Function to get the file reading, time and results folder from setting file
82 */
83 void getFileTimeFolder(string &reading_file, double &time, string &results_folder) {
84     ifstream setting_file;
85     string time_str;
86
87     // Open setting file and read its contents
88     setting_file.open("D:\\TFM_Aplicacion\\Application_Qt\\Application\\Settings\\setting_file.txt");
89 }
```

```

89     if (setting_file.is_open()) {
90         getline(setting_file, reading_file);
91         getline(setting_file, time_str);
92         getline(setting_file, results_folder);
93         setting_file.close();
94     }
95     else {
96         cout << "Fichero inexistente o faltan permisos" << endl;
97     }
98
99     time = atof(time_str.c_str());
100 }
101
102
103 /*
104  Function to get the user id
105  */
106 void getUserId(string &user_id) {
107     ifstream users_file;
108     string line;
109
110     // Open setting file and read its contents
111     users_file.open("D:\\TFM_Aplicacion\\Application_Qt\\Application\\Settings\\Users.txt");
112     if (users_file.is_open()) {
113         while (getline(users_file, line)) {
114             user_id = line;
115         }
116         users_file.close();
117     }
118     else {
119         cout << "Fichero inexistente o faltan permisos" << endl;
120     }
121 }
122
123
124 /*
125  Function to change the format
126  */
127 void changeFormat(string &reading_file) {
128
129     int i = 0;
130     for (;;) {
131         i = reading_file.find("/", i);
132         if (i == string::npos) {
133             break;
134         }
135         reading_file.replace(i, 1, "\\");
136     }
137 }
138
139 int main()
140 {
141     // Creating MyGaze class object
142     MyGaze on_gaze;
143
144     // Get the file reading, time and results folder from setting file
145     string reading_file;
146     string results_folder;
147     double time = 0.0;
148     getFileTimeFolder(reading_file, time, results_folder);
149
150     // Get the user id
151     string user_id;
152     getUserId(user_id);
153
154     // Change format of the results folder
155     changeFormat(results_folder);
156
157     // Create a folder for user
158     string user_folder = results_folder + "\\" + user_id;
159     namespace fs = std::experimental::filesystem;
160     // Check if folder_user exists
161     if (!fs::exists(user_folder)) {
162         fs::create_directory(user_folder);
163     }
164
165     // Files to save reading pattern
166     ofstream full_file, reduced_file;
167     string full_reading_pattern = user_folder + "\\full_reading_pattern.txt";
168     string reduced_reading_pattern = user_folder + "\\reduced_reading_pattern.txt";
169     full_file.open(full_reading_pattern);
170     reduced_file.open(reduced_reading_pattern);
171
172     // Variables for the main program
173     clock_t start;
174     double diff_ms_bef = 0.0;
175     double diff_ms = 0.0;
176
177     // Main program
178     start = clock();

```



```

179 while (diff_ms < time) {
180     // Update time and recalculate difference in milliseconds
181     diff_ms = double(clock() - start) / CLOCKS_PER_SEC;
182
183     // To get a frame rate of approximately 30 fps
184     if (diff_ms - diff_ms_bef >= 0.03) {
185         // Save all information in the full file.
186         // Modify value of EyeY because origin coordinate is different.
187         full_file << diff_ms << "\t" << Is_fix << "\t" << State << "\t" << LeftEyeX << "\t"
188             << (-1 * LeftEyeY) + 1080 << "\t" << LeftEye_pSize << "\t" << LeftEye_pCenterX
189             << "\t" << (-1 * LeftEye_pCenterY) + 1080 << "\t" << RightEyeX << "\t"
190             << (-1 * RightEyeY) + 1080 << "\t" << RightEye_pSize << "\t" << RightEye_pCenterX
191             << "\t" << (-1 * RightEye_pCenterY) + 1080 << "\t" << endl;
192
193         // Save only the instants which there are values. In this case, the coordinate Y is also
194         // modified
195         if ((LeftEyeX != 0.0) && (RightEyeX != 0.0)) {
196             reduced_file << diff_ms << "\t" << Is_fix << "\t" << State << "\t" << LeftEyeX << "\t"
197                 << (-1 * LeftEyeY) + 1080 << "\t" << LeftEye_pSize << "\t" << LeftEye_pCenterX
198                 << "\t" << (-1 * LeftEye_pCenterY) + 1080 << "\t" << RightEyeX << "\t"
199                 << (-1 * RightEyeY) + 1080 << "\t" << RightEye_pSize << "\t" << RightEye_pCenterX
200                 << "\t" << (-1 * RightEye_pCenterY) + 1080 << "\t" << endl;
201         }
202         diff_ms_bef = diff_ms;
203     }
204 }
205 full_file.close();
206 reduced_file.close();
207 }
208
209

```

Anexo 3: Código del programa de generación de resultados

```
1  // MostrarResultados.cpp: define el punto de entrada de la aplicación de consola.
2  //
3  #include <Windows.h>
4  #include <iostream>
5  #include <fstream>
6  #include <experimental\filesystem>
7  #include "stdafx.h"
8  #include "gnuplot.h"
9
10
11  /*
12  Function to get the file reading, time and results folder from setting file
13  */
14  void getFileTimeFolder(string &reading_file, float &time, string &results_folder) {
15      ifstream setting_file;
16      string time_str;
17
18      // Open setting file and read its contents
19      setting_file.open("D:\\TFM_Aplicacion\\Application_Qt\\Application\\Settings\\setting_file.txt");
20      if (setting_file.is_open()) {
21          getline(setting_file, reading_file);
22          getline(setting_file, time_str);
23          getline(setting_file, results_folder);
24          setting_file.close();
25      }
26      else {
27          cout << "Fichero inexistente o faltan permisos" << endl;
28      }
29
30      time = atof(time_str.c_str());
31
32  }
33
34  /*
35  Function to get the user id
36  */
37  void getUserId(string &user_id) {
38      ifstream users_file;
39      string line;
40
41      // Open setting file and read its contents
42      users_file.open("D:\\TFM_Aplicacion\\Application_Qt\\Application\\Settings\\Users.txt");
43      if (users_file.is_open()) {
44          while (getline(users_file, line)) {
45              user_id = line;
46          }
47          users_file.close();
48      }
49      else {
50          cout << "Fichero inexistente o faltan permisos" << endl;
51      }
52  }
53
54
55  void changeFormat(string &reading_file) {
56
57      int i = 0;
58      for (;;) {
59          i = reading_file.find("/", i);
60          if (i == string::npos) {
61              break;
62          }
63          reading_file.replace(i, 1, "\\");
64      }
65  }
66
67  }
68
69  int main()
70  {
71      // Variables and Previous procedures to show results correctly
72      // Get the file reading, time and results folder from setting file
73      string reading_file;
74      float time = 0.0;
75      string results_folder;
76      getFileTimeFolder(reading_file, time, results_folder);
77
78      // Get the user id
79      string user_id;
80      getUserId(user_id);
81
82      // Change format of the reading_file path and results folder to be accepted
83      changeFormat(reading_file);
84      changeFormat(results_folder);
85
86      // Create a folders inside user folder
87      string user_folder = results_folder + "\\\" + user_id;
88      string png_left = user_folder + "\\png_left";
89      namespace fs = std::experimental::filesystem;
90      // Check if that folder exists
91      if (!fs::exists(png_left)) {
```

```

92     fs::create_directory(png_left);
93 }
94 string png_right = user_folder + "\\png_right";
95 // Check if that folder exists
96 if (!fs::exists(png_right)) {
97     fs::create_directory(png_right);
98 }
99
100 // String with full_reading_pattern and reduced_reading_pattern
101 string full_reading_pattern = user_folder + "\\full_reading_pattern.txt";
102 string reduced_reading_pattern = user_folder + "\\reduced_reading_pattern.txt";
103
104 // Path results
105 string full_left_path = user_folder + "\\Left_full.png";
106 string full_right_path = user_folder + "\\Right_full.png";
107 string left_path = user_folder + "\\Left.png";
108 string right_path = user_folder + "\\Right.png";
109 string left_color = user_folder + "\\Left_color.png";
110 string right_color = user_folder + "\\Right_color.png";
111 string left_pupil = user_folder + "\\Left_pupil.png";
112 string right_pupil = user_folder + "\\Right_pupil.png";
113
114 // Define GNUPLOT
115 Gnuplot plot;
116
117 // FULL reading pattern
118 // Plot with path
119 // Left
120 plot("set xrange [0:1919]");
121 plot("set yrange [0:1079]");
122 plot("set title 'Left'");
123 plot("unset key"); // Hide legend
124 plot("set terminal png");
125 plot("set output '" + full_left_path);
126 plot("plot '" + reading_file + "' binary filetype = png w rgbimage, '" + full_reading_pattern + "' using 4:5 with lines");
127
128 // Right
129 plot("set xrange [0:1919]");
130 plot("set yrange [0:1079]");
131 plot("set title 'Right'");
132 plot("unset key"); // Hide legend
133 plot("set terminal png");
134 plot("set output '" + full_right_path);
135 plot("plot '" + reading_file + "' binary filetype = png w rgbimage, '" + full_reading_pattern + "' using 9:10 with lines");
136
137 // The rest of the results are obtained from the reduced reading pattern
138 // Plots with path
139 // Left
140 plot("set xrange [0:1919]");
141 plot("set yrange [0:1079]");
142 plot("set title 'Left'");
143 plot("unset key"); // Hide legend
144 plot("set terminal png");
145 plot("set output '" + left_path);
146 plot("plot '" + reading_file + "' binary filetype = png w rgbimage, '" + reduced_reading_pattern + "' using 4:5 with lines");
147
148 // Right
149 plot("set xrange [0:1919]");
150 plot("set yrange [0:1079]");
151 plot("set title 'Right'");
152 plot("unset key"); // Hide legend
153 plot("set terminal png");
154 plot("set output '" + right_path);
155 plot("plot '" + reading_file + "' binary filetype = png w rgbimage, '" + reduced_reading_pattern + "' using 9:10 with lines");
156
157 // Plots with path and line time
158 // Times in String
159 int div = int(time / 3);
160 string div0 = to_string(0);
161 string div1 = to_string(div);
162 string div2 = to_string(div * 2);
163 string total_time = to_string(time);
164 // Left
165 plot("set xrange [0:1919]");
166 plot("set yrange [0:1079]");
167 plot("set title 'Left with time'");
168 plot("unset key");
169 plot("set terminal png");
170 plot("set output '" + left_color);
171 plot("set cbrange[0:'" + total_time + "']");
172 plot("set palette defined('" + div0 + "' 'red', '" + div1 + "' 'yellow', '" + div2 + "' 'green', '" + total_time + "' 'blue')");
173 plot("plot '" + reading_file + "' binary filetype = png w rgbimage, '" + reduced_reading_pattern + "' using 4:5:1 with lines linecolor palette linewidth 1");
174
175 // Right
176 plot("set xrange [0:1919]");
177 plot("set yrange [0:1079]");
178 plot("set title 'Right with time'");
179 plot("unset key");

```

```

182 plot("set terminal png");
183 plot("set output '" + right_color);
184 plot("set cbrange[0:]" + total_time + "];");
185 plot("set palette defined('" + div0 + "' 'red', '" + div1 + "' 'yellow', '" + div2 + "' 'green', '" + total_time + "' 'blue')");
186 plot("plot '" + reading_file + "' binary filetype = png w rgbimage, '" + reduced_reading_pattern + "' using 9:10:1 with lines linecolor palette linewidth 1");
187
188
189 // Plots with Evolution of pupil size in the time
190 // Left
191 plot("set xrange [0:]" + total_time + "];");
192 plot("set yrange [0:200]");
193 plot("set title 'Left: Pupil size vs time'");
194 plot("unset key");
195 plot("set terminal png");
196 plot("set output '" + left_pupil);
197 plot("plot '" + reduced_reading_pattern + "' using 1:6 with lines");
198
199 // Right
200 plot("set xrange [0:]" + total_time + "];");
201 plot("set yrange [0:200]");
202 plot("set title 'Right: Pupil size vs time'");
203 plot("unset key");
204 plot("set terminal png");
205 plot("set output '" + right_pupil);
206 plot("plot '" + reduced_reading_pattern + "' using 1:11 with lines");
207
208
209 // Animation
210 // Left
211 string images_left = png_left + "\\plot_";
212 plot("set xrange [0:1919]");
213 plot("set yrange [0:1079]");
214 plot("unset key");
215 for (int i = 0; i < 210; i++) {
216     plot("outfile=sprintf('" + images_left + "%i.png', " + to_string(i) + ")");
217     plot("set output outfile");
218     plot("plot '" + reading_file + "' binary filetype = png with rgbimage, '" + reduced_reading_pattern + "' using 4:5 every ::: " + to_string(i) + " with lines");
219 }
220
221 string path_movie_left = user_folder + "\\Left_movie.mpeg";
222 string ffmpeg_tmp = "ffmpeg -framerate 30 -i " + png_left + "\\plot_%d.png " + path_movie_left;
223 cout << ffmpeg_tmp.c_str() << endl;
224 system(ffmpeg_tmp.c_str());
225
226 // Right
227 string images_right = png_right + "\\plot_";
228 plot("set xrange [0:1919]");
229 plot("set yrange [0:1079]");
230 plot("unset key");
231 for (int i = 0; i < 210; i++) {
232     plot("outfile=sprintf('" + images_right + "%i.png', " + to_string(i) + ")");
233     plot("set output outfile");
234     plot("plot '" + reading_file + "' binary filetype = png with rgbimage, '" + reduced_reading_pattern + "' using 9:10 every ::: " + to_string(i) + " with lines");
235 }
236
237 string path_movie_right = user_folder + "\\Right_movie.mpeg";
238 ffmpeg_tmp = "ffmpeg -framerate 30 -i " + png_right + "\\plot_%d.png " + path_movie_right;
239 cout << ffmpeg_tmp.c_str() << endl;
240 system(ffmpeg_tmp.c_str());
241
242
243 }

```

11. Bibliografía

- Ahrens, A. (1981). Die Bewegung der Augen beim Schreiben.
- Allopenna, P. D., Magnuson, J. S., and Tanenhaus, M. K. (1998). Tracking the time course of spoken word recognition using eye movements: Evidence for continuous mapping models. *J. Mem. Lang.* 38, 419–439. doi:10.1006/jmla.1997.2558.
- Asociación Americana de Psiquiatría (2000). *Diagnostic and statistical manual-IV*.
- Bailey, B. P., Busbey, C. W., and Iqbal, S. T. (2007). TAPRAV: An interactive analysis tool for exploring workload aligned to models of task execution. *Interact. Comput.* 19, 314–329. doi:10.1016/j.intcom.2007.01.004.
- Betke, M., Gips, J., and Fleming, P. (2002). The Camera Mouse: Visual tracking of body features to provide computer access for people with severe disabilities. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 10, 1–10. doi:10.1109/TNSRE.2002.1021581.
- Boleas-aguirre, M., Migliaccio, A. A., and Carey, J. P. (2007). Registro del reflejo vestibulooculomotor con la técnica de la bobina corneal en campo magnético (scleral search coil). Revisión de afecciones vestibulares periféricas. 58, 321–326.
- Bolt, R. A. (1981). Gaze-orchestrated dynamic windows. *Proc. SIGGRAPH* 15, 254–257. doi:10.1145/965161.806796.
- Bradford, J. (2011). Designing web pages for dyslexic readers.
- Bredesen, D., Rao, R., and Mehlen, P. (2006). Cell death in the nervous system. *Nature* 443, 796–802.
- British Dyslexia Association (2012). Dyslexia style guide. Available at: <http://www.bdadyslexia.org.uk/>.
- Brunswick, N. (2010). “Unimpaired reading development and dyslexia across different languages,” in *Reading and Dyslexia in Different Orthographies*, 131–154.
- Buswell, G. T. (1935). How People Look at Pictures.
- Buswell, G. T. (1937). How adults read.
- Carrillo, M. S., Alegría, J., Miranda, P., and Pérez, S. (2011). Evaluación de la dislexia en la escuela primaria: Prevalencia en español. *Escritos Psicol.* 4, 35–44.
- Chacon, S. (2016). Esclerosis múltiple. <http://www.webconsultas.com/esclerosis-multiple/esclerosis-multiple-316>.
- Chalkley, B., Waterfield, J., and Network, G. D. (2001). Providing learning support for students with hidden disabilities and dyslexia undertaking fieldwork and related activities. *Geogr. Discip. Netw.*
- Crane, H. D. (1994). *The Purkinje Image Eyetracker, Image Stabilization, and Related Forms of Stimulus Manipulation*.
- Crane, H. D., and Steele, C. M. (1985). Generation-V dual-Purkinje-image eyetracker. *Appl. Opt.* 24, 527. doi:10.1364/AO.24.000527.
- Critchley, M. (1970). *The dyslexic child*. Heinemann.
- Cuddihy Elisabeth Guan Zhiwei Ramey, J. (2005). Protocol Considerations for Using Eye-Tracking

- in Website Usability Testing. *Stcorg*, 292–297. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Protocol+Considerations+for+Using+Eye-Tracking+in+Website+Usability+Testing#1>.
- Cuetos, F., and Valle, F. (1988). Modelos de lectura y dislexias. *Infanc. y Aprendiz.* 44, 3–19.
- Cutrell, E., and Guan, Z. (2007). What are you looking for? *Proc. SIGCHI Conf. Hum. factors Comput. Syst. - CHI '07*, 407. doi:10.1145/1240624.1240690.
- Delabarre, E. (1898). A method of recording eye movements. *Am. J. Psychology*, 572–574.
- Dickinson, A., Gregor, P., and Newell, A. F. (2002). On going investigation of the ways in which some of the problems encountered by some dyslexics can be alleviated using computer techniques. *Proc ASSETS'02*, 97–103.
- Dodge, R., and Cline, T. S. (1901). The angle velocity of eye movements. *Psychol. Rev.* 8, 145–157. doi:10.1037/h0076100.
- Drewes, H. (2010). Eye gaze tracking for human computer.
- Duchowski, A. (2007). *Eye tracking methodology: Theory and practice*. doi:10.1007/978-1-84628-609-4.
- Duchowski, A. T. (2002). A breadth-first survey of eye-tracking applications. *Behav. Res. methods, instruments, Comput.* 34, 455–470. doi:10.3758/BF03195475.
- Ehmke, C., and Wilson, S. (2007). Identifying web usability problems from eye-tracking data. *Hci 2007*, 119–128. doi:10.1145/1531294.1531311.
- Evet, L., and Brown, D. (2005). Text formats and web design for visually impaired and dyslexic readers-clear text for all. *Interact. Comput.*, 453–472.
- Faraone, S., Biederman, J., and Mick, E. (2006). The age-dependent decline of attention deficit hyperactivity disorder: a meta-analysis of follow-up studies. *Psychological Med.* 36, 159–165.
- Feman, S., and Reinecke, R. (1997). *Handbook of pediatric ophthalmology*.
- Ferhat, O., and Vilarino, F. (2016). Low Cost Eye Tracking: The Current Panorama. *Comput. Intell. Neurosci.* 2016. doi:10.1155/2016/8680541.
- Fernández, G., Mandolesi, P., Rotstein, N., Colombo, O., Agamennoni, O., and Politi, L. (2013). Eye Movement Alterations During Reading in Patients With Early Alzheimer Disease.
- Friedman, R. (1996). Recovery from deep alexia to phonological alexia: Points on a continuum. *Brain Lang.* 52, 114–128.
- Frische, F., Osterloh, J., and Ludtke, A. (2011). Modelling and validating pilots visual attention allocation during the interaction with an advanced flight management system. 165–172. doi:10.1007/978-88-470-1821-1.
- Galván Gómez, R. (2010). Dislexia va en aumento. *Peruvian, Newsep.*, 22.
- Garcés, M. (2016). Estudio sobre las enfermedades neurodegenerativas en España y su impacto económico y social.
- Gila, L., Villanueva, A., and Cabeza, R. (2009). Fisiopatología y técnicas de registro de los movimientos oculares. *An. Sist. Sanit. Navar.* 32 Suppl 3, 9–26. doi:10.4321/S1137-66272009000600002.

- Goldberg, J. H., and Helfman, J. I. (2010). Scanpath clustering and aggregation. *Proc. 2010 Symp. Eye-Tracking Res. Appl. - ETRA '10*, 227. doi:10.1145/1743666.1743721.
- Goldberg, J. H., and Kotval, X. P. (1999). Computer interface evaluation using eye movements: Methods and constructs. *Int. J. Ind. Ergon.* 24, 631–645. doi:10.1016/S0169-8141(98)00068-7.
- Graham, D. J., Orquin, J. L., and Visschers, V. H. M. (2012). Eye tracking and nutrition label use: A review of the literature and recommendations for label enhancement. *Food Policy* 37, 378–382. doi:10.1016/j.foodpol.2012.03.004.
- Green, P. (2002). Where do drivers look while driving (and for how long). *Hum. factors traffic Saf.*, 77–110.
- Gregor, P., and Newell, A. F. (2000). An empirical investigation of ways in which some of the problems encountered by some dyslexics may be alleviated using computer techniques. *Proc ASSETS'00*, 85–91.
- Hanson, E. K. S. (2004). Focus of attention and pilot error. *Proc. Eye Track. Res. Appl. Symp. Eye Track. Res. Appl. - ETRA'2004*, 60–60. doi:10.1145/968363.968377.
- Hargreaves, H. (2007). *Study skills for dyslexic students*.
- Hillier, R. (2008). Sylexiad: A typeface for the adult dyslexic reader. *J. Writ. Creat. Pract.* 1, 275–291.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., and Van de Weijer, J. (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*.
- Hornof, A. J., and Cavender, A. (2005). EyeDraw: enabling children with severe motor impairments to draw with their eyes. *Proc. ACM CHI 2005 Conf. Hum. Factors Comput. Syst.* 1, 161–170. doi:10.1145/1054972.1054995.
- Horrey, W., and Wickens, C. (2007). In vehicle glance duration: Distributions, tails, and model of crash risk. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2018, 22–28.
- Huey, E. (1898). Preliminary experiments in the physiology and psychology of Readings. *Am. J. Psychology*, 575–586.
- Hyokki, S. (2011). Visual Eye Tracking Data as Medium in User Dialogue.
- Interagency Commission on Learning Disabilities (1987). *Learning Disabilities: A report to the U.S Congress*.
- Jacob, and Karn, K. (2003). “Eye tracking in human computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises”, In *The Mind's Eye: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movement Research*. 573–605.
- Javal, L. (1879). “Essai sur la physiologie de la lecture,” in *Annales d'Oculistique*, 240–274.
- Jiménez, J. E., Guzmán, R., Rodríguez, C., and Artiles, C. (2009). Prevalencia de las dificultades específicas de aprendizaje: La dislexia en español. *An. Psicol.* 25, 78–85.
- Joachims, T., Granka, L., and Pan, B. (2005). Accurately interpreting clickthrough data as implicit feedback. *Proc. SIGIR 2005*, 154–161. doi:10.1145/1076034.1076063.
- Johnson, S. P., Amso, D., and Slemmer, J. a (2003). Development of object concepts in infancy: Evidence for early learning in an eye-tracking paradigm. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 100, 10568–10573. doi:10.1073/pnas.1630655100.

- Joint Programme - Neurodegenerative Disease Research (2014). What is Neurodegenerative disease? <http://www.neurodegenerationresearch.eu/about/what/>.
- Judd, C., McAllister, C., and Steel, W. (1905). General introduction to a series of studies of eye movements by means of kinetoscopic photographs.
- Kammerer, Y., and Gerjets, P. (2010). How the Interface Design Influences Users' Spontaneous Trustworthiness Evaluations of Web Search Results: Comparing a List and a Grid Interface. *ETRA '10 Proc. 2010 Symp. Eye-Tracking Res. Appl.* 1, 299–306. doi:10.1145/1743666.1743736.
- Katusic, S., Colligan, R., Barbaresi, W., Schaid, D., and Jacobsen, J. (2001). Incidence of reading disability in a population-based birth cohort, 1976-1982. *Mayo Clininc Proc.*
- Kelly, D., and Cool, C. (1994). The Effects of Topic Familiarity on Information Search Behaviour. *Mod. Lang. J.* 78, 179–189. doi:10.1111/j.1540-4781.1994.tb02030.x.
- King, L. A. (2009). Visual navigation patterns and cognitive load. *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)* 5638 LNAI, 254–259. doi:10.1007/978-3-642-02812-0_30.
- Kowler, E. (2012). Eye movements: The past 25 years. 51, 1457–1483. doi:10.1016/j.visres.2010.12.014.Eye.
- Lai, M. L., Tsai, M. J., Yang, F. Y., Hsu, C. Y., Liu, T. C., Lee, S. W. Y., et al. (2013). A review of using eye-tracking technology in exploring learning from 2000 to 2012. *Educ. Res. Rev.* 10, 90–115. doi:10.1016/j.edurev.2013.10.001.
- Lamare, M. (1892). "Des mouvements des yeux dans la lecture," in *Bulletins et Mémoires de la Société Francaise d'Ophthalmologie*, 354–364.
- Landerl, K., Bevan, A., and Butterworth, B. (2004). Developmental dyscalculia and basic numerical capacities: A study of 8-9 year-old students. *Cognition* 93, 99–125.
- De Leeuw, R. (2010). Special font for dyslexia?
- Liversedge, S. P., and Findlay, J. M. (2000). Saccadic eye movements and cognition. *Trends Cogn. Sci.* 4, 6–14. doi:10.1016/S1364-6613(99)01418-7.
- Lockley, S. (2002). Dyslexia and higher education: accessibility issues.
- López Castro, M. . (2010). Intervención educativa en un caso real de problemas de comprensión lectora. *Hekademos Rev. Educ. Digit.* 6, 27–48.
- Lyon, G. ., Shaywitz, S., and Shaywitz, B. (2003). A definition of dyslexia. *Ann. Dyslexia* 53, 1–14.
- Majaranta, P., Räihä, K.-J., Techniques, a C. M. S. I. G. on C. G. and I., Interaction, a C. M. S. I. G. on C.-H., and Machinery, A. for C. (2002). Twenty Years of Eye Typing: Systems and Design Issues. *Eye Track. Res. Appl. Symp.*, 15–22. doi:10.1145/507072.507076.
- Martens, M. H., and Fox, M. (2007). Does road familiarity change eye fixations? A comparison between watching a video and real driving. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 10, 33–47. doi:10.1016/j.trf.2006.03.002.
- Martin, T., and Corbett, J. (2000). *Los requisitos en oftalmología. Neuroftalmología.*
- Maughan, L., Gutnikov, S., and Stevens, R. (2007). Like more, look more, look more, like more: The evidence from eye-tracking. 14, 335–342. doi:10.1057/palgrave.bn.

- McCarthy, J. ., and Swierenga, S. . (2010). What we know about dyslexia and web accessibility: a research review. *Univers. Access Inf. Soc.*, 147–152.
- McCarthy, J. D., Sasse, M. A., and Riegelsberger, J. (2004). Could I have the menu please? An eye tracking study of design conventions. *People Comput.* 17, 401–414. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.123.3761&rep=rep1&type=pdf>.
- Mena, B., Nicolau, R., Salat, L., Tort, P., and Romero, B. (2006). *Guía práctica para educadores. El alumno con TDAH*.
- Menezes, A., Van Oorschot, P., and Vanstone, S. (1997). “Hash Functions and Data Integrity,” in *Handbook of Applied Cryptography*, 321–376.
- Merchant, J., Morrisette, R., and Porterfield, J. L. (1974). Remote measurement of eye direction allowing subject motion over one cubic foot of space. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 21, 309–317. doi:10.1109/TBME.1974.324318.
- Michanie, C. (2004). “Diferencias del trastorno por déficit de atención en el niño y el adulto: consideraciones diagnósticas y terapéuticas,” in *Psicofarmacología Psicométrica IV- Actualizaciones 2004*, 59–82.
- Milosavljevic, M., Navalpakkam, V., Koch, C., and Rangel, A. (2012). Relative visual saliency differences induce sizable bias in consumer choice. *J. Consum. Psychol.* 22, 67–74. doi:10.1016/j.jcps.2011.10.002.
- Mitchell, S., and Wich, B. (1974). “Tratamiento clínico de la visión binocular: disfunciones heterofóricas, acomodativas y oculomotoras,” in, 374.
- Moacdieh, N., and Sarter, N. (2012). Eye Tracking Metrics: A Toolbox for Assessing the Effects of Clutter on Attention Allocation. *SAGE Publications* 56, 1366–1370.
- Mölsa, P., Marttila, R., and Rinne, U. (1986). Survival and cause of death in Alzheimer’s disease and multi-infarct dementia. 74, 103–107.
- Morimoto, C. H., and Mimica, M. R. M. (2005). Eye gaze tracking techniques for interactive applications q. 98, 4–24. doi:10.1016/j.cviu.2004.07.010.
- Morton, J. (1979). Word recognition. *Psycholinguist. Ser.* 2, 107–156.
- National Institute of Neurological disorders and stroke (2015). Enfermedad de Parkinson: Esperanza en la investigación. https://espanol.ninds.nih.gov/trastornos/parkinson_disease_spanish.htm.
- O’Brien, B. A., Mansfield, J. S., and Legge, G. E. (2005). The effect of print size on reading speed in dyslexia. *J. Res. Read.* 28, 332–349.
- Orjales, I. (2011). *Deficit de Atención con Hiperactividad. “Manual para padres y educadores.”*
- Oyekoya, O., and Stentiford, F. (2006). Eye tracking—a new interface for visual exploration. *BT Technol. J.* 24, 1–10. doi:10.1007/978-0-387-76316-3_14.
- Paciello, M. . (2000). *Web accesibility for people with disabilities*. 1st ed.
- Patterson, K. . (1995). The relation between reading and phonological coding: Futher neuropsychological observations. *Neurocase* 1, 251–257.
- Paulesu, E., Démonet, J., Fazio, F., McCrovy, E., Chanoine, V., Brunswick, N., et al. (2001). Dyslexia: Cultural diversity and biological unity. *Science (80-.)*. 291, 2165–2167.

- Pedley, M. (2006). Designing for dyslexics: Part 3.
- Peer, L., and Reid, G. (2001). *Dyslexia: Successful inclusion in the secondary school*.
- Perdesen, J. S. (2008). User centred design of a multimodal reading training system for dyslexics.
- Ponsoda, V., Scott, D., and Findlay, J. M. (1995). A probability vector and transition matrix analysis of eye movements during visual search. *Acta Psychol. (Amst)*. 88, 167–185. doi:10.1016/0001-6918(95)94012-Y.
- Poole, A., and Ball, L. J. (2005). Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Current Status and Future Prospects. *Encycl. Human-Computer Interact.*, 211–219. doi:10.4018/978-1-59140-562-7.
- Poole, A., Ball, L. J., and Phillips, P. (2004). Eye-Movement Analysis of Bookmark Recognition. *People Comput. XVIII - Design Life Proc. HCI 2004*.
- Popa, L., Selejan, O., Scott, A., Mureanu, D. F., Balea, M., and Rafila, A. (2015). Reading beyond the glance: eye tracking in neurosciences. *Neurol. Sci.* 36, 683–688. doi:10.1007/s10072-015-2076-6.
- Porterfield, W. (1737). “An essay concerning the motions of our eyes. Part I. Of their external motions,” in *Medical Essays and Observations* 3, 160–263.
- Rainger, P. (2012). A dyslexic perspective on e-content accessibility.
- Ramírez Sánchez, D. M. (2011). Estrategias de intervención educativa con el alumnado con dislexia. *Innovación y Exp. Educ.*
- Ravyseu, I., Sahliu, H., Cornelisn, J., and Brussel, V. U. (2000). Eye Activity Detection and Recognition using Morphological Scale-space Decomposition. 1080–1083.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in Reading and Information Processing: 20 Years of Research. *Psychol. Bull.* 124, 372–422. doi:10.1037/0033-2909.124.3.372.
- Reinhardt, M., and Reinhardt, C. (2013). Attention deficit-hyperactivity disorder, comorbidities, and risk situations. 89, 124–130.
- Rello, L. (2014). DysWebxia: A text Accessibility Model for People with Dyslexia.
- Robinson, D. A. (1968). The Oculomotor Control System: A Review. *Proc. IEEE* 56, 1032–1049. doi:10.1109/PROC.1968.6455.
- Rosch, J. L., and Vogel-Walcutt, J. J. (2013). A review of eye-tracking applications as tools for training. *Cogn. Technol. Work* 15, 313–327. doi:10.1007/s10111-012-0234-7.
- Rozado, D., Agustin, J. S., Rodriguez, F. B., and Varona, P. (2012a). Gliding and saccadic gaze gesture recognition in real time. *ACM Trans. Interact. Intell. Syst.* 1, 1–27. doi:10.1145/2070719.2070723.
- Rozado, D., Moreno, T., San Agustin, J., Rodriguez, F. B., and Varona, P. (2015). Controlling a Smartphone Using Gaze Gestures as the Input Mechanism. 30, 34–63.
- Rozado, D., Rodriguez, F. B., and Varona, P. (2010). Optimizing Hierarchical Temporal Memory for Multivariable Time Series. 506–518.
- Rozado, D., Rodriguez, F. B., and Varona, P. (2012b). Low cost remote gaze gesture recognition in real time. *Appl. Soft Comput. J.* 12, 2072–2084. doi:10.1016/j.asoc.2012.02.023.
- Rozado, D., Rodriguez, F. B., and Varona, P. (2012c). Neurocomputing Extending the bioinspired

- hierarchical temporal memory paradigm for sign language recognition \$. *Neurocomputing* 79, 75–86. doi:10.1016/j.neucom.2011.10.005.
- Rozado, D., Rodriguez, F. B., Varona, P., and Tom, C. F. (2011). Gaze Gesture Recognition with Hierarchical Temporal Memory Networks. 1–8.
- Rubinsztein, D. (2006). The roles of intracellular protein-degradation pathways in neurodegeneration. *Nature* 443, 780–786.
- Rüsseler, J., Probst, S., Johannes, S., and Münte, T. F. (2003). Recognition memory for high-and low-frequency words in adult normal and dyslexic readers: an event-related brain potential study. *J. Clin. Exp. Neuropsychol.* 25, 815–829.
- de Santana, V. ., de Oliveira, R., Almeida, L. D. ., and Baranauskas, M. C. . (2012). Web accesibility and people with dyslexia: a survey on techniques and guidelines. *Proc. W4A '12*, 35.
- Schneps, M. H., Thomson, J. ., Sonnert, G., Pomplun, M., Chen, C., and Heffner-Wong, A. (2013). Shorter lines facilitate reading in those who struggle. *PLoS One* 8.
- Sears, and Young, M. (2002). Physical disabilities and computing technologies: an analysis of impairments. 482–503.
- Sharafi, Z., Soh, Z., and Gueheneuc, Y.-G. (2015). A systematic literature review on the usage of eye-tracking in software engineering. *Inf. Softw. Technol.* 67, 79–107. doi:10.1016/j.infsof.2015.06.008.
- Shaywitz, S., Escobar, M., Shaywitz, B., Fletcher, J., and Makuch, R. (1992). Evidence That Dyslexia May Represent the Lower Tail of a Normal Distribution of Reading Ability. *N. Engl. J. Med.* 326, 145–150.
- Simmons, F., and Singleton, C. (2000). The reading comprehension abilities of dyslexic students in higher education. *Dyslexia* 6, 178–192.
- Smythe, I. (2010). *Dyslexia in the Digital Age: Making IT Work*.
- Sykes, J. (2008). Dyslexia, desing and reading: Making print work for college students with dyslexia.
- Tabert, M., Liu, X., Doty, R., Serby, M., Zamora, D., Pelton, G., et al. (2006). A 10-item smell identification scale related to risk for Alzherimer’s disease. 58, 155–160.
- Taylor, S. E. (1971). *The dynamic activity of reading: A model of the process*.
- Temple, C. M. (1984). “Developmental analogues to acquired phonologica dyslexia,” in *Dyslexia: a global issue*.
- Tian, Y. L., Kanade, T., and Cohn, J. F. (2000). Dual-state parametric eye tracking. *Proc. - 4th IEEE Int. Conf. Autom. Face Gesture Recognition, FG 2000*, 110–115. doi:10.1109/AFGR.2000.840620.
- Tinker, M. a., and Paterson, D. G. (1931). Studies of typographical factors influencing speed of reading. VII. Variations in color of print and background. *J. Appl. Psychol.* 15, 471–479. doi:10.1037/h0076001.
- Tseng, A. (2012). Six surprising bad practices that hurt dyslexic users.
- Tulunay-Keesey (1982). Fading of stabilized images. 72, 440–447.
- Tuñón, M. D. (2016). Esclerosis lateral amiotrófica. <http://www.webconsultas.com/esclerosis->

lateral-amiotrofica/esclerosis-lateral-amiotrofica-2668.

- University Lancaster and Lytham Hospital (2012). Eye Tracking and Alzheimer's Disease. *J. Am. Aging Assoc.*
- Vellutino, F. R., Fletcher, J. M., Snowling, M. J., and Scanlon, D. . (2004). Specific reading disability (dyslexia): What have we learned in the past four decades? *J. child Psychol. psychiatry* 45, 2–40.
- Waldemar, H., Dubois, B., and Emre, M. (2007). Recommendations for diagnosis and management of Alzheimer's disease and other disorders associated with dementia: EFNS guideline. 1–26.
- Weaver, P. A. (1978). Comprehension, recall, and dyslexia: A proposal for the application of schema theory. *Ann. Dyslexia* 28, 92–113.
- Wedel, M., and Pieters, R. (2000). Eye fixations on advertisements and memory for brands: A model and findings. 297–312.
- Weinstein, C. E., and Mayer, R. E. (1986). The teaching of learning strategies. *Handb. Res. Teach.* 3, 315–327.
- Wendel, M., and Pieters, R. (2011). *Review of Eye-Tracking Research in Marketing.* doi:10.1186/2045-8118-8-17.
- Wimmer, H. (1993). Characteristics of developmental dyslexia in a regular writing system. *Appl. Psycholinguist.* 14.
- Yarbus, A. L. (1967). Eye movements and vision. *Neuropsychologia* 6, 222. doi:10.1016/0028-3932(68)90012-2.
- Young, L. R., and Sheena, D. (1975). Survey of eye movement recording methods. *Behav. Res. Methods Instrum.* 7, 397–429. doi:10.3758/BF03201553.
- Zarach, V. (2012). Ten guidelines for improving accessibility for people with dyslexia.
- Zorzi, M., Barbiero, C., Facoettia, A., Lonciari, I., Carrozzi, M., Montico, M., et al. (2012). Extra-large letter spacing improves reading in dyslexia. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 11455–11459.